

Comunicaciones Eléctricas



Investigación y tecnología

Volumen 62 N° 3/4 1988

ALCATEL

Comunicaciones Eléctricas presenta las investigaciones, los desarrollos y las realizaciones conseguidas por Alcatel NV y sus compañías asociadas.

Publicada desde 1922 en versión inglesa, se edita actualmente en cuatro idiomas y se distribuye en el mundo entero.

Editor-Jefe internacional
Michael Deason, Romford

Ediciones locales
Comunicaciones Eléctricas
Antonio Soto, Madrid

Revue des Télécommunications
Catherine Camus, Paris.

Electrical Communication
Rod Hazell, Romford

Elektrisches Nachrichtenwesen
Wolfgang Schmid, Stuttgart

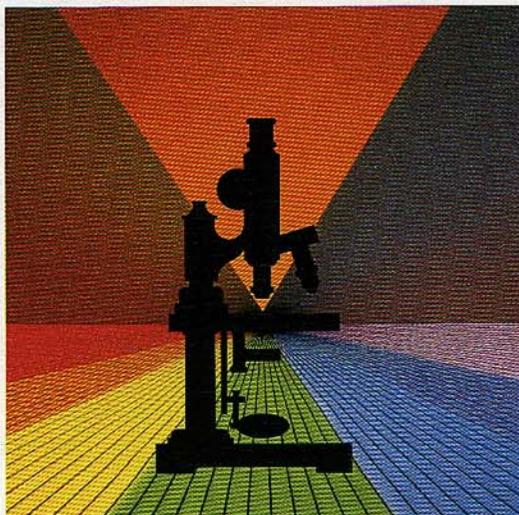
Publicado en abril de 1989
© Alcatel NV, 1989

Las direcciones de los editores se dan en la página 364

Comunicaciones Eléctricas, Director:
A. Soto, Ramírez de Prado, 5
28045 Madrid (España)

Investigación y tecnología

- 220 **Presentación**
- 222 **Ataque de semiconductores y metales inducido por láser de excimeros**
J.-L. Peyre, D. Rivière, C. Vannier y G. Villela
- 229 **Puertas ópticas para impresoras de alta resolución y gran velocidad**
R. Dorn
- 235 **Tecnologías de las preformas para fibras ópticas**
R. Dorn y C. Le Sergent
- 242 **Investigación en componentes optoelectrónicos**
O. Hildebrand, J. Benoit y E. Duda
- 251 **Producción de componentes optoelectrónicos**
C. Amouroux, J.-P. Pestie e I. R. Isert
- 259 **Especificación, diseño, prototipos y verificación de sistemas de programación**
J. De Man, L. Duponcheel, W. Van Puymbroeck y R. Pérez Domínguez
- 265 **Programas Ada correctos a partir de especificaciones algebraicas: el proyecto PROSPECTRA de ESPRIT**
P. de la Cruz y A. Pérez Riesco
- 273 **Tecnologías de inteligencia artificial para aplicaciones en tiempo real y orientadas a objetos**
F. Barachini y Ch. Benoit
- 280 **Reglas de asignación de prioridades para optimizar tiempos de respuesta**
M. Villén-Altamirano
- 288 **Recientes logros en tecnologías de proceso de voz y sus aplicaciones**
M. Immendörfer y E. Mumolo
- 294 **Familia de codificadores de vídeo para redes STM y ATM**
R. Heiss, A. Rousseau y W. Verbiest
- 302 **Demodulación multiportadora a bordo de satélites para repetidores no transparentes**
M.-L. Boucheret
- 310 **Sistema protegido experimental de información distribuida**
C. Fritzner, K. Presttun, J.-T. Richardsen y G. Søberg
- 318 **Sistemas de transmisión optoelectrónicos de alta velocidad**
R. Heidemann
- 325 **Red experimental BERKOM y concepto de RDSI-BA con distribución de TV**
G. Domann
- 333 **Comunicación de datos en una red ATM**
M. De Prycker
- 338 **Nuevo protocolo para transmisión de datos en células ATM**
J. Coupaye, G. Gastaud y G. Le Bihan
- 343 **Arquitectura de redes locales y urbanas de fibra óptica para transmisión óptica coherente**
A. Fioretti, C. A. Rocchini, S. R. Treves y L. Torchin
- 352 **Investigación y tecnología en microelectrónica**
J. Danneels, A. Mozer y M. Rahier
- 362 **En este número**



Los técnicos y científicos de Alcatel se afanan constantemente por encontrar soluciones nuevas y mejores que mantengan el ímpetu del crecimiento actual en las telecomunicaciones. Las fronteras de esta tecnología sólo avanzarán como resultado de una investigación tenaz e incisiva en la que se concentren y aglutinen los recursos de los laboratorios de Alcatel para crear una exploración del futuro unificada y convergente.

Presentación

Desde su creación en 1987, fue evidente la importancia que Alcatel NV, líder de telecomunicaciones en Europa, concede a la investigación. Por ser la telecomunicación uno de los campos más sujetos a innovación de la vida moderna, soporte de todos los sectores de la actividad humana, hay un continuo crecimiento en las demandas de los usuarios que a su vez exige el desarrollo de nuevos medios para satisfacerlas.

Sin embargo, al crearse la Compañía se dudaba entre concentrar los medios de investigación y desarrollo en uno o en muy pocos lugares, o más bien distribuirlos entre las distintas casas europeas. La concentración favorece la comunicación – importante para los investigadores – y el uso compartido de equipos, optimizando así el rendimiento de las inversiones, pero también acarrea una falta de flexibilidad si la unidad de investigación excede claramente del “tamaño crítico” necesario.

Alcatel posee compañías de telecomunicación en la mayoría de los países europeos, cada una con su propia división de desarrollo y responsable de ganancias y pérdidas. Por consiguiente, se decidió proseguir las actividades en esos Centros, aunque agrupadas bajo la égida de un *Grupo de Investigación Alcatel* común. Actualmente existen once *Centros de Investigación Locales* (LRC), y dos más comenzarán en breve a operar, estrechamente vinculados todos a sus respectivas compañías nacionales y concentrados en dar soporte a su estrategia de desarrollo y de negocio.

La distribución del esfuerzo investigador se traduce en una intensa participación en las actividades y programas de investigación en los respectivos países. Además, facilita el enrolamiento de expertos por toda Europa y promueve una cooperación más eficaz con universidades y centros de investigación estatales y privados. Los LRC reciben muy pronto información sobre los resultados de la investigación y las tendencias tecnológicas en su país, y pueden influir sobre tales tendencias con base en los resultados de los trabajos de uno o más miembros del referido Grupo de Investigación Alcatel. Además, los LRC prestan un fuerte apoyo en el campo de la normalización, dada su estrecha relación con las Administraciones nacionales de telecomunicación y su regular comunicación con otras compañías Alcatel. Otra ventaja importante de distribuir las actividades de investigación entre los principales centros de desarrollo es facilitar la transferencia de tecnología de dichos centros a las compañías de fabricación locales.

Tales ventajas podrían esfumarse, sin embargo, si los LRC funcionaran independientemente pues habría superposición de actividades y se perdería la sinergia resultante de una estrecha colaboración. Para garantizar que tal cosa no ocurra, el Grupo de Investigación Alcatel se ha estructurado como Centro de Investigación único con un *Programa Común de Investigación*, si bien sus departamentos y divisiones están repartidos por toda Europa. Pese al relativamente corto tiempo transcurrido desde la formación de Alcatel, esta organización de investigación funciona ya con eficacia en provecho de toda la Compañía. Las reuniones periódicas de los directores de LRC aseguran la comunicación necesaria de sus Centros, y el programa común de investigación se prepara y actualiza mediante un procedimiento bien definido.

Debe determinarse después la cantidad de esfuerzo de investigación y desarrollo que una compañía como Alcatel necesita y puede justificar económicamente. Las cifras revelan que la industria de telecomunicación suele gastar en investigación del uno al dos por ciento de las ventas o de la fuerza de trabajo total, y del diez al quince por ciento en desarrollo. Alcatel se sitúa dentro de ese margen. La Compañía cuenta aproximadamente con 1200 profesionales que trabajan en investigación, garantizando que las tecnologías necesarias estarán a disposición de todas las casas Alcatel para desarrollos futuros.

Dentro de Alcatel, las investigaciones se reparten en *áreas clave* coordinadas cada una por un experto, responsable de asegurar que ese trabajo se realiza eficazmente y sin duplicaciones entre LRC. Se han definido además algunos proyectos estratégicos comunes que se realizan conjuntamente por varios LRC, con objetivos específicos que suelen afectar a varias áreas clave de investigación.

El programa común de investigación entero, compuesto de las áreas clave y los proyectos estratégicos, se analiza y acuerda anualmente con los directivos de grupos de productos y otras personas de Alcatel decisivas en las actividades comerciales, de fabricación y de desarrollo. Finalmente, dicho programa debe ser aprobado por el Departamento de Investigación y Tecnología de Alcatel para que la sinergia sea máxima y la redundancia mínima. Este departamento es también responsable de asegurar que el programa cubre los objetivos estratégicos de Alcatel.

Este número de *Comunicaciones Eléctricas* trata solamente de algunos temas cubiertos por las áreas clave de tecnología, tales como materiales y componentes, microelectrónica, fibra óptica, optoelectrónica, tecnologías de soporte lógico y de sistemas, proceso de señal, tecnologías de satélites, transmisión óptica y sistemas de comunicación de banda ancha. Dado que la RDSI se está introduciendo ya en numerosos países, los artículos van todavía más lejos, aunque varios de ellos podrían aplicarse a aspectos específicos de la RDSI. Como esta red se integrará con la RDSI-BA (RDSI de banda ancha) en los próximos diez años, el Grupo de Investigación Alcatel concentra ahora su esfuerzo en redes, servicios y terminales para dicha RDSI-BA.

Parte importante de este esfuerzo se dedicará al interfaz hombre-máquina en el aspecto de factores humanos, con el fin de asegurar que los avanzados servicios a introducir puedan ser utilizados por el público normal sin consultar gruesos manuales ni recibir cursillos de adiestramiento; ello es de crucial importancia para la aceptación de nuevos servicios por la mayoría de posibles usuarios. Lo mismo puede decirse de la futura "estación de trabajo multimedia" que proporcionará una completa gama de servicios RDSI-BA: proceso de datos y de textos, gráficos, facsímil, imágenes fijas, videotelefonía, videoconferencia y servicios de TV normal y de alta definición. Ya se han realizado y probado satisfactoriamente prototipos de estas estaciones, de construcción modular para adaptarse a las necesidades de usuarios particulares y afrontar el riesgo de obsolescencia.

El Grupo de Investigación Alcatel participa intensamente en los programas de investigación ESPRIT y RACE, concretamente en 67 proyectos de la Comunidad Europea. Estos programas se dirigen primordialmente a proporcionar comunicaciones integradas de banda ancha para implantación en 1995. La especialmente amplia gama de actividades de investigación en Alcatel, junto con su extensa participación en los programas nacionales y europeos, garantiza el acceso de todas las casas Alcatel a las avanzadas tecnologías que se necesitarán en los años venideros para el desarrollo de nuevos equipos, sistemas y servicios de telecomunicación. Así, Alcatel se mantendrá en vanguardia de la tecnología de telecomunicación, en una época en que el ritmo de introducción de nuevos servicios es el más rápido que ha conocido la historia de la industria.



H. Ohnsorge
Alcatel NV, París

Ataque de semiconductores y metales inducido por láser de excímeros

A medida que se reducen las dimensiones características de los componentes micro y optoelectrónicos, crece el interés por el desarrollo de nuevas técnicas de ataque de los materiales constitutivos de estos componentes de alta integración. Las nuevas técnicas ahora investigadas se caracterizan por el ataque con especies neutras, el proceso sin máscaras, selectividad de materiales y menores daños eléctricos.

J.-L. Peyre
D. Rivière
C. Vannier
G. Villela

Laboratoires de Marcoussis, Marcoussis,
Francia

Introducción

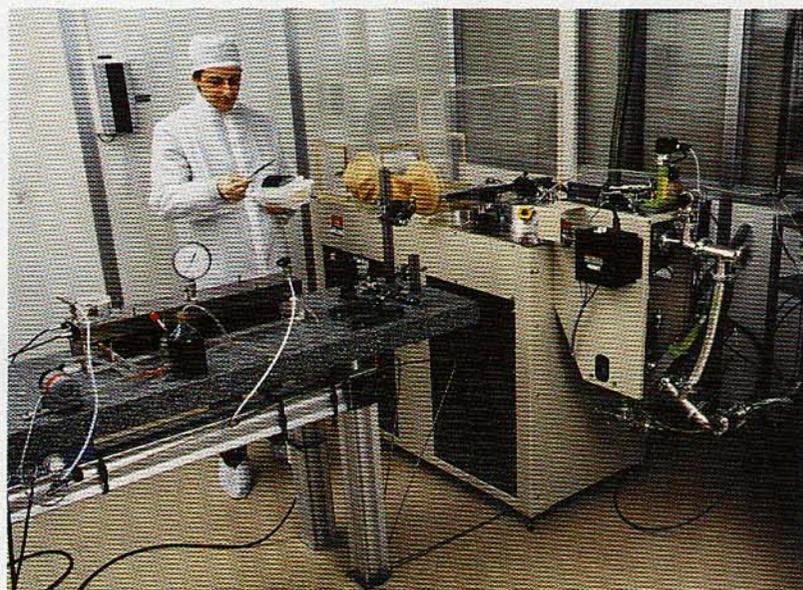
El desarrollo de la próxima generación de dispositivos semiconductores avanzados requiere nuevas tecnologías de microfabricación. En los últimos años ha aparecido gran variedad de herramientas de ataque químico, y se han elaborado numerosas técnicas de ataque seco y húmedo basadas en tecnologías químicas y de plasma iónico, además de algunas técnicas de microfabricación de gran éxito que utilizan procesos de ataque anisotrópico en silicio monocristalino.

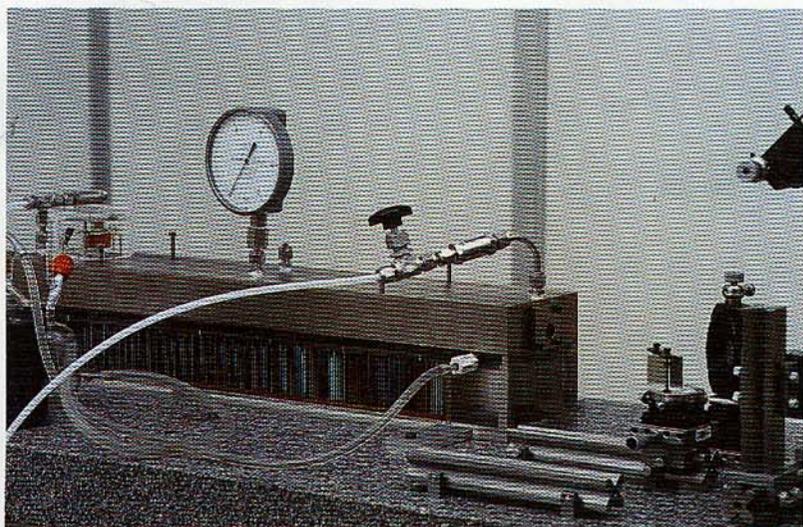
Los láseres de excímeros se utilizan actualmente para el marcado de circuitos en procesos litográficos, y además crece el

interés por los procesos con láser en microelectrónica y optoelectrónica al ser más fiables las fuentes de ultravioleta (UV). Por sus propiedades excepcionales, los láseres de excímeros reúnen todas las ventajas de la radiación láser con la posibilidad de escribir y marcar a escala de submicra¹. Para el ataque controlado de alta resolución y la modificación de las propiedades superficiales del material, presentan los siguientes atributos:

- corta longitud de onda, que les permite resolución de submicras con sistemas limitados por difracción (desde 193 nm con mezcla de gas ArF hasta 308 nm con mezcla de XeCl)
- alto coeficiente de absorción de UV para la mayoría de los materiales, que limita la profundidad de penetración de la radiación y permite un ataque preciso y controlado de una capa tras otra
- suficiente energía fotónica (≥ 4 eV) para producir excitación en una sola etapa o ruptura de enlaces en numerosas moléculas, promoviendo una gran reactividad química de gases y/o sólidos (moléculas, átomos, adsorbados, etc.)
- exposiciones cortas (≤ 50 ns), que limitan la extensión física de los daños térmicos durante el impulso y permiten utilizar procesos menos perjudiciales, a menor temperatura
- baja coherencia espacial, eliminando el fenómeno de la coherencia espacial de la luz en sistemas de formación de imágenes

Sala limpia de ataque con un prototipo de láser de excímeros y un reactor modificado de ataque iónico desarrollado por Alcatel.





Láser de excímeros compacto desarrollado en Laboratoires de Marcoussis.

- intensificación de las reacciones químicas y desorción de productos en la superficie sin bombardeo iónico, con lo que se reduce el daño superficial con respecto a los procesos de plasma
- posibilidad de fabricación sin máscaras por proyección directa.

No obstante, la mayoría de los estudios realizados hasta ahora son incompletos por intervenir demasiados parámetros en las reacciones fundamentales. En consecuencia, se necesita investigación básica e industrial para mejorar acusadamente estas nuevas tecnologías. De las distintas técnicas de proceso inducido por láser, el ataque de los materiales utilizados en microelectrónica y optoelectrónica se ha estudiado profundamente en diversos laboratorios; los de Marcoussis se han concentrado en el ataque fotoasistido de fosforo de indio, silicio y aluminio.

Estado de la técnica

Los materiales que han de atacarse pueden clasificarse en: semiconductores, metales, aislantes inorgánicos y polímeros orgánicos.

Semiconductores

El ataque puede realizarse sobre semiconductores elementales, o sobre compuestos de los grupos III-V y II-VI. En el caso del silicio, las investigaciones más detalladas se han realizado en una atmósfera de cloro^{2,3,4}, obteniendo altas resoluciones. En Laboratoires de Marcoussis y otros Centros se ha investigado el ataque de silicio mono y policristalino para materiales tipos *n* y *p*, con diferentes concentraciones de impurezas y orientaciones cristalográficas. Junto a la activación térmica de reacción al ataque,

deben tenerse en cuenta, al interpretar los resultados, la generación de pares electrón-hueco en la superficie del material y la excitación electrónica selectiva del gas de ataque.

En el caso de semiconductores compuestos, se ha probado el ataque en seco para GaAs⁵, y con menos amplitud para CdS e InP. Los gases más utilizados fueron Cl₂, HBr, CF₃Br y CH₃Br. Asimismo se ha notificado⁵ el ataque de grandes áreas de GaAs por láseres de ArF. Se ha experimentado el marcado de sustratos tanto por aplicación de máscaras directas como por proyección del haz del láser de excímeros a través de máscara sobre la muestra.

Recientemente se ha demostrado que puede haber descomposición fotoablativa cuando se excitan con luz del láser de excímeros materiales semiconductores como GaAs, InP y el poliacetileno polímero^{6,7}. En estos materiales pueden crearse también estructuras submicrónicas sin que se aprecie fusión en el sustrato circundante. En vista de su importancia potencial para las industrias de fabricación, y en particular para los procesos de semiconductores, es preciso cuantificar y desarrollar esta técnica de ataque seco con láser para uso en industrias de micro y optoelectrónica.

Metales

Muchos metales y aleaciones, entre ellos aluminio, cobre, molibdeno y titanio^{8,9,10,11}, pueden ser atacados químicamente con láser de excímeros. Los gases reactivos que utiliza el proceso son esencialmente haluros o compuestos de haluros, y particularmente el cloro. En general, el proceso de ataque se compone de varias etapas consecutivas¹²:

- adsorción superficial y difusión del gas reactivo en el cuerpo del metal M
- ruptura de enlaces químicos (M-M)
- excitación por láser de la capa M-Cl_x por excitación electrónica y calentamiento superficial
- ataque de la superficie por desorción y expulsión de M, Cl y M-Cl_x mediante el impulso del láser.

Dieléctricos

Los dieléctricos inorgánicos como sílice, vidrios y óxidos se pueden atacar mediante compuestos tales como CF₂Br₂, CF₂Cl₂ y NF₃^{13,14}. Los óxidos y nitruros utilizados hoy para capas de pasivación en procesos VLSI se atacan, casi exclusivamente, con técnicas de plasma seco. Los excelentes resultados así obtenidos se ven cada vez más amenazados por la sensibilidad de las capas subyacentes a los daños eléctricos que

originan las descargas, lo cual va reduciendo el rendimiento según disminuyen las dimensiones características. El desarrollo de un proceso de ataque fotoestimulado debe eliminar los problemas de descargas eléctricas.

Polímeros

La eliminación por láser de polímeros orgánicos y materiales biológicos se ha estudiado profundamente en los últimos años¹⁵. La luz del láser deshace los enlaces químicos en la superficie del sustrato, a densidades de energía luminosa bastante inferiores a la que originaría fusión, típicamente de 0,01 a 0,1 J/cm². Se han realizado experiencias en el aire con radiaciones de ArF y KrF (193 y 248 nm, respectivamente) sobre materiales tales como polímeros PET y PMMA y la poliimida. Se ha obtenido marcado directo con resoluciones hasta de 0,2 μm¹⁶.

Modelo experimental

El modelo experimental consta de un reactor de ataque iónico modificado, proporcionado por Alcatel Systèmes Dépôt et Gravure, Annecy, y un láser de excímeros construido en Laboratoires de Marcoussis. El haz láser es reflejado por un espejo dieléctrico multicapa y entra en la cámara de reacción a través de una ventana de sílice fundida o flúor para la irradiación normal de la muestra (Fig. 1). Una bomba mecánica y una bomba turbomolecular en la cámara producen un vacío de 3 × 10⁻⁵ mbar. Pueden obtenerse presiones de trabajo entre 10⁻² y 10² mbar con el sistema de bombeo utilizado en Laboratoires de Marcoussis.

Se han construido y utilizado en este laboratorio dos prototipos de láser de excímeros (Tabla 1), especialmente adecuados por su compacidad para este tipo de estudios experimentales (720 × 190 × 210 mm). Las principales características de estos nuevos láseres¹⁷, capaces de generar impulsos de hasta 500 mJ con una sección de haz cuadrada (20 × 20 mm) a un bajo ritmo de repetición, son el fotodisparo (efecto corona), la sencillez de los circuitos de conmutación (sin tiratrón) y el almacenamiento de la energía en la raya espectral del agua. Además, se puede trabajar en tres distintas longitudes de onda (193, 248 y 308 nm) cambiando la mezcla de gas y los espejos de la cavidad.

Los materiales se atacan normalmente por medio de un haz ligeramente enfocado, con una lente que hace converger luz hacia el sustrato. Se determinó la profundidad de ataque por medio de un rugosímetro, obteniendo las vistas transversales con un microscopio electrónico de barrido.

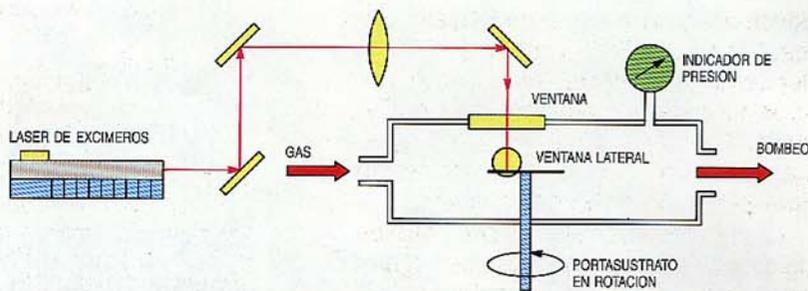


Figura 1 Esquema del aparato experimental.

Tabla 1 – Láser de excímeros desarrollado en Laboratoires de Marcoussis

	Láser de excímeros	
	1º modelo	2º modelo
Energía del impulso	150 mJ	500 mJ
Velocidad de repetición	10 Hz	10 Hz
Potencia media	300 mW	4 W
Sección transversal del haz	10 × 10 mm	20 × 20 mm
Duración del impulso	30 ns	30 ns

Ataque del fosforo de indio

Se irradiaó InP intrínseco con fotones de 193 ó 248 nm en atmósfera de CH₃Br ó CF₃Br. En general, la elección del gas reactivo es importante porque los fragmentos fotodisociados (ej., radicales CF₃ y átomos de bromo generados por excitación láser) tienen que reaccionar lo más uniformemente posible con fósforo y con indio para evitar cambios estequiométricos en las capas superficiales. Aunque el CH₃Br hubiera atacado al InP con un láser de KrF (Tabla 2), el aspecto de la superficie era malo, observándose depósitos en la zona de impacto del láser y su alrededor. El análisis de fluorescencia a los rayos X reveló átomos de bromo en la superficie atacada.

No es práctico mejorar la desorción de productos tales como InBr₃ y PBr₃ calentando el sustrato a más de 400 °C, pues se puede dañar el material. Otras experiencias con CF₃Br y un láser ArF tuvieron más éxito. Se obtuvieron velocidades de ataque de 3 Å por impulso a 7 mbar de presión con

Tabla 2 – Condiciones experimentales para el ataque intrínseco del InP

Gas reactivo	Gas láser	Densidad de energía luminosa láser (mJ/cm ²)	Veloc. de ataque (Å/impulso)	Aspecto de superficie
CH ₃ Br	KrF	500	17	malo
CH ₃ Br	ArF	50	1	depósitos
CF ₃ Br	ArF	50	3	superficie lisa

Resultados para una presión de gas de 7 mbar con una tasa de fusión de 20 centímetros cúbicos estándar por minuto.

densidades de energía luminosa relativamente bajas ($< 50 \text{ mJ cm}^{-2}$). Se eliminaron depósitos indeseables en el borde de la superficie atacada mediante algunos impulsos de láser en vacío al final de la experiencia: no se detectaron átomos de bromo, flúor, ni carbón en la zona atacada.

Los procesos de ataque seco suelen dañar a los dispositivos optoelectrónicos como resultado de las radiaciones y el bombardeo de partículas cargadas. Se ha emprendido la caracterización eléctrica de superficies de InP atacadas, utilizando para las mediciones APD (fotodiodos de avalancha) de InP/InGaAs con estructura planar (Fig. 2). Alrededor de 2000 \AA de zona activa de InP en la parte superior del dispositivo se atacaron con el tratamiento láser (tras eliminar en plasma la capa de pasivación de Si_3N_4). Para evaluar la corriente de fugas resultante de la posible contaminación se midió la corriente de oscuridad en función de la tensión inversa de los diodos antes y después del proceso (Fig. 3). Esta corriente es baja en los APD planares con anillo de guarda; los valores típicos medidos a $0,9 \text{ V}_B$ (tensión de ruptura) varían de 10 a 20 nA para un área total de la unión de $1,1 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$. Tras el proceso, estos valores se multiplicaron de 1,4 a 100 veces según fuera la posición del diodo dentro de la zona de impacto del láser (simultáneamente se iluminaron unos 50 diodos dispuestos en matriz). No obstante, las tensiones de ruptura de los dispositivos permanecieron sin cambios.

Se compararon estos resultados con un tratamiento similar (ataque de 2000 \AA de InP) en un plasma de Ar/O_2 (25% de O_2 a una presión de 2×10^{-4} torr). La gran disminución de la tensión de ruptura en este caso (Fig. 3) revela una alta densidad de defectos en el sustrato y en la unión del anillo de guarda como resultado del bombardeo iónico, sugiriendo que los procesos láser dañan menos la superficie.

Los procesos fotoquímicos con CF_3Br conllevan una notable selectividad del ataque con SiO_2 (relación casi infinita de velocidad de ataque), lo que representa una ventaja significativa frente a las tecnologías de bombardeo iónico. Sin duda, la excitación láser produce solamente especies útiles en los procesos de ataque. Como se ha demostrado en otro lugar¹⁸, los radicales CF_3 no son los reactivos de ataque más eficientes para el SiO_2 con láser de excímeros. Ello permitió utilizar muestras con máscaras de SiO_2 para evaluar la anisotropía del ataque. Los perfiles obtenidos con este tipo de máscara en InP presentan una pendiente positiva rugosa, todavía no explicada. Sólo cuando se haya mejorado la anisotropía podrá introducirse el tratamiento

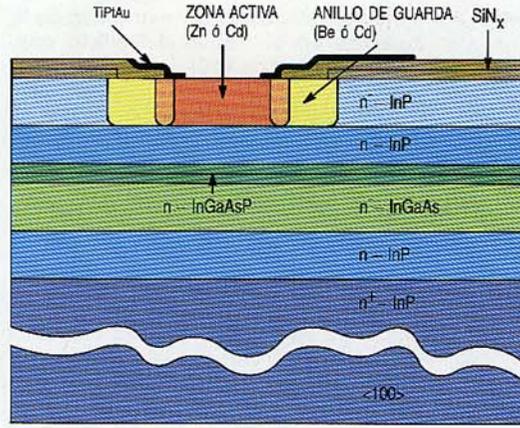


Figura 2
Estructura de un APD planar InP/InGaAs para sistemas de comunicaciones ópticas (Laboratoire de Marcoussis).

con láser para la fabricación de fotodiodos mesa y láseres de semiconductores.

Ataque del silicio

Se realizaron experiencias en silicio mono y policristalino, dopado con fósforo o boro (muestras de tipos *p* y *n*), atacado con láseres de excímeros de XeCL y KrF. En la tabla 3 se resumen los resultados.

El óxido nativo se eliminó sumergiendo las obleas en una solución de fluoruro de hidrógeno y lavándolas en agua pura (desionizada) antes de introducirlas en la cámara, pues de otro modo resultaba difícil comenzar el ataque. Con el montaje experimental no se detectó ataque reproducible para densidades de energía inferiores a los umbrales indicados en la tabla 3; es posible que se produzca un ataque muy ligero³, pero se necesitarían más disparos láser para detectarlo. No obstante, los resultados revelan una clara diferencia en umbrales de densidad de energía y en velocidades de

Figura 3
Corriente de oscuridad en función de la tensión inversa para un APD.

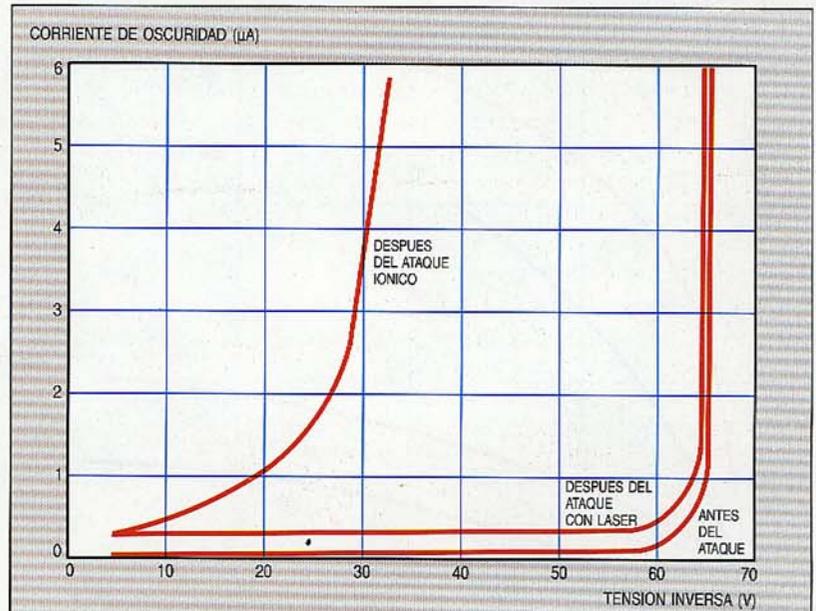


Tabla 3 – Influencia del dopado y estructura de la muestra en el ataque del silicio utilizando un láser de XeCl

Cristal	Dopado (cm ⁻³)	Umbral de densidad de energía luminosa (mJ/cm ²)	Veloc. de ataque (Å/impulso)
Si < 111 >	<i>n</i> ; 10 ¹⁵	450	0,5
	<i>n</i> ; 3·10 ¹⁷	150	0,9
	<i>n</i> ⁺ ; 2·10 ¹⁸	450	0,5
	<i>p</i> ; 10 ¹⁵	600	0,5
Poli-Si	<i>p</i> ; 10 ¹⁵	500	0,7
	<i>n</i> ⁺ ; 10 ²⁰	350	0,8

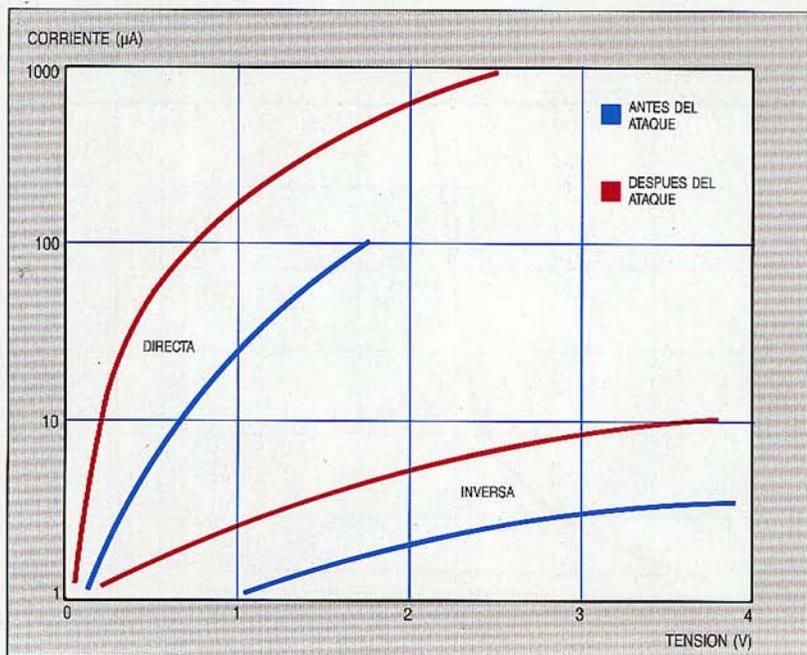
El ataque se realizó con gas reactivo de cloro a presión de 20 mbar con una tasa de fusión de 200 centímetros cúbicos estándar por minuto.

Sección transversal del InP atacado con máscara de SiO₂, que presenta pendiente positiva rugosa. Láser de ArF: 5000 disparos de 50 mJ/cm²; gas CF₃Br: 7 mbar.



ataque entre muestras tipo *p* y tipo *n*, así como entre muestras con diferentes niveles de dopado. Se precisaron mayores densidades de energía luminosa para atacar el silicio tipo *p*, lo que indica la importancia de los portadores fotogenerados (sobre todo

Figura 4 Características I(V) de contactos Schottky de mercurio-silicio *n* antes y después del ataque con láser.



los electrones en la banda de conducción) para el ataque². Los portadores de silicio tipo *n* facilitan la formación de enlaces entre los átomos de silicio y las sustancias adsorbidas (átomos de Cl generados por la excitación láser).

Se señaló asimismo la influencia de otros parámetros experimentales del ataque, tales como la presión del cloro (1 mbar a 100 mbar) y el flujo de gas (20 a 200 centímetros cúbicos por minuto). Los resultados mejoraron algo para altas presiones y flujos de gas elevados, si bien la fuerte absorción del haz láser a 308 nm limita la velocidad de ataque a altas presiones. Se encontraron buenas condiciones para el ataque en torno a los 20 mbar, que constituye un buen compromiso entre la creación de sustancias reactivas cerca de la superficie y la desorción de productos volátiles SiCl_x. Se obtuvieron velocidades de ataque entre 0,5 y 1 Å por impulso, que preservaban la calidad de la superficie atacada reduciendo los efectos fototérmicos. El análisis de iones secundarios por espectroscopio de masas no reveló la presencia de átomos residuales de Cl en la superficie.

Se consiguió un ataque direccional de líneas de 0,5 µm con máscara de SiO₂ en silicio monocristalino, con alta selectividad y anisotropía. La presencia de óxido nativo, que no pudo eliminarse tratando con FH debido a la máscara, puede explicar la reducida velocidad de ataque (0,3 Å/impulso) en el fondo de los surcos.

Similares experiencias en películas de polisilicio fuertemente dopadas con fósforo no produjeron la misma anisotropía del ataque: el tamaño de línea quedó reducido por el rebaje. La anisotropía podría aumentarse a bajas temperaturas añadiendo un gas de deposición en el reactor para proteger las paredes². Las experiencias con gas reactivo NF₃ y excitación con láser de ArF no aportaron ningún avance apreciable en este campo, aunque pueden ser de importancia clave en la industria microelectrónica.

La caracterización eléctrica de contactos Schottky Hg-Si de silicio tipo *n* no reveló cambios apreciables en las características I(V) y C(V) antes y después del proceso láser. Solamente una ligera degradación en la característica inversa I(V) (Fig. 4) denunciaba escasas impurezas superficiales, pero los diodos conservaron el carácter rectificador usual. Se precisarían otras mediciones de muestras tipo *p* para calibrar los efectos en la superficie de una mayor densidad de energía luminosa del láser.

Ataque del aluminio

El ataque de película de aluminio evaporado se efectuó exponiendo a longitudes de

onda de 308 y 248 nm (Tabla 4), con gas cloro como agente reactivo. La velocidad de ataque se determinó contando el número de impulsos requerido para atacar estas películas en todo su espesor. Los mejores resultados se obtuvieron con láser de KrF, aunque la fotodisociación del cloro es débil a esa longitud de onda y por ello hay pocos átomos de Cl. Las velocidades de ataque parecen obedecer más a la dinámica de las reacciones superficiales con Cl₂ que a la fotogeneración de radicales Cl en la fase de gas. Además, el comienzo del ataque se retarda por la presencia de óxido nativo Al₂O₃ en la superficie. Se requieren por tanto impulsos de alta energía al principio de la prueba para eliminar esa película que no reacciona eficazmente con el cloro. Los fotones del láser de ArF deberían facilitar el inicio del proceso de ataque. En un próximo futuro se harán experiencias a 193 nm.

Conclusiones

Se ha probado con éxito el ataque controlado, inducido por láseres de excímeros que emiten a 193, 248 y 308 nm, de diversos materiales, tales como InP, Si y Al. También se ha investigado el comportamiento de varios gases reactivos, entre ellos los CH₃Br, CF₃Br y Cl₂. Hay que subrayar los siguientes puntos:

- pueden conseguirse velocidades de ataque en torno a 1 μm por minuto, suficiente para la fabricación de circuitos integrados
- los procesos fotoquímicos conllevan una notable selectividad de ataque
- se ha comprobado que el daño en el InP y el Si es limitado en el proceso inducido por láser
- el proceso in situ con posibilidad de limpiado por láser previo o posterior dentro de la cámara es ventajoso para impedir la contaminación.

Se esperan progresos en otros campos de esta técnica. Por ejemplo, hay que trabajar en perfeccionar el control de la anisotropía del ataque y en comprender mejor la fisicoquímica de las reacciones involucradas. Los anteriores ensayos sobre el ataque de SiO₂ han sido infructuosos porque los fuertes enlaces interatómicos de este material le hacen difícil de atacar; hasta ahora las velocidades conseguidas son muy bajas (0,015 Å por impulso).

La homogeneidad del haz láser, el elevado ritmo de repetición de impulsos, la alta fiabilidad y estabilidad entre los impulsos son también objeto de estudio en Laboratoi-

res de Marcoussis con el fin de que los láseres de excímeros sean instrumentos útiles en la industria de los semiconductores. El proceso por proyección pastilla a pastilla, de manera secuencial, será probablemente la mejor solución en el futuro. El estudio de técnicas no litográficas obligará a acoplar con el haz láser un sistema de



Ataque anisotrópico del silicio con máscara de SiO₂.
Máscara SiO₂:
 0,12 μm;
profundidad de ataque: 0,4 μm;
anchura de las líneas: 0,5 μm;
láser XeCl: 10000 disparos de 400 mJ/cm²;
gas Cl₂: 20 mbar.

proyección adecuado. Sin embargo, subsiste el problema de conseguir una óptica de proyección exenta de aberraciones en UV que transmita un nivel de energía del láser muy superior al de la fotolitografía convencional. Si se afrontan todos estos retos la incorporación de los láseres de excímeros a la industria de fabricación microelectrónica será un paso importante en el progreso tecnológico.

Agradecimientos

Los autores quieren agradecer a B. Lacour y C. Gagnol el apoyo técnico prestado en los láseres. Asimismo agradecen a G. Ripoché y a C. Blanjet (División de Componentes Optoelectrónicos, Laboratoires de Marcoussis) y J.-P. Gilles (Institut d'Electronique Fondamentale, Orsay) su contribución a las medidas eléctricas.

Referencias

- 1 D. J. Ehrlich, J. G. Black, M. Rotschild y S. W. Pang: Emerging Technology for In-situ Processing: Patterning Alternatives: *Journal of Vacuum Science Technology*, 1988, volumen B6, n° 3, pág. 895.
- 2 Y. Horiike, N. Hayasaka, M. Sekine, T. Arikado, M. Nakase y H. Okano: Excimer-Laser Etching on Silicon: *Applied Physics*, 1987, volumen A44, pág. 313.

Tabla 4 - Ataque de aluminio en cloro

Láser	Presión de Cl ₂ (mbar)	Tasa de fusión (sccm*)	Densidad de energía luminosa (J/cm ²)	Tasa de ataque (Å/impulso)
XeCl	0,1	20	1	10
XeCl	20	20	1	10
KrF	20	20	0,250	40

* centímetros cúbicos estándar por minuto

- 3 R. Kullmer y D. Bäuerle: Laser-Induced Chemical Etching of Silicon in Chlorine Atmosphere: *Applied Physics*, 1987, volumen A43, pág. 227.
- 4 J.-L. Peyre, D. Rivière, C. Vannier y G. Villela: Laser-Induced Photoetching of Semiconductors with Chlorine: *Workshop on Emerging Technologies for In-situ Processing*, 1987, NATO ASI Series E139, Cargese, pág. 213.
- 5 P. Brewer, D. McClure y R. M. Osgood: Dry, Laser-Assisted Rapid HBr Etching of GaAs: *Applied Physics Letters*, 1985, volumen 47, n° 3, pág. 310.
- 6 M. Golombok, M. C. Gower, S. J. Kirby y P. T. Rumsby: Photoablation of Plasma Polymerized Polyacetylene Films: *Journal of Applied Physics*, 1987, volumen 61, n° 3, pág. 1222.
- 7 G. M. Davis, D. W. Thomas y M. C. Gower: Excimer Laser Direct Etching of GaAs: *Journal Physics D: Applied Physics* 21, abril 1988, pág. 683.
- 8 G. Koren, F. Ho y J. J. Ritsko: Excimer Laser Etching of Al Metal Films in Chlorine Environments: *Applied Physics Letters*, 1985, volumen 46, n° 10, pág. 1006.
- 9 W. Sesselmann y T. J. Chuang: Chlorine Surface Interaction and Laser-Induced Surface Etching Reactions: *Journal of Vacuum Science Technology*, 1985, volumen B3, n° 5, pág. 1507.
- 10 J. E. Andrew, P. E. Dyer, R. D. Greenough y P. H. Key: Metal Film Removal and Patterning Using an XeCl Laser: *Applied Physics Letters*, 1983, volumen 43, n° 11, pág. 1076.
- 11 G. L. Loper y M. D. Tabat: UV Laser-Generated Fluorine Atom Etching of Polycrystalline Si, Mo and Ti: *Applied Physics*, 1985, volumen 46, n° 7, pág. 654.
- 12 D. Bäuerle: Chemical Processing with Lasers: Springer Series in Materials 1, *Springer-Verlag*, 1986.
- 13 J. H. Brannon: Glass Etching Initiated by Excimer Laser Photolysis of CF_2Br_2 : *Journal of Physical Chemistry*, 1986, volumen 90, pág. 1784.
- 14 S. Yokoyama, Y. Yamakage y M. Hirose: Anisotropic Etching of SiO_2 by Excimer Laser Irradiation: *Dry Process Symposium*, 1987, Tokyo.
- 15 R. Srinivasan: UV Laser Ablation of Organic Polymer Films: Laser Processing and Diagnostics: *Springer Series in Chemical Physics*, Springer-Verlag, 1984, volumen 39, pág. 343.
- 16 M. Latta, R. Moore, S. Rice y K. Jain: Excimer Laser Projection Photoetching: *Journal of Applied Physics*, 1984, volumen 56, n° 2, pág. 586.
- 17 B. Lacour: High Efficiency Switchless Operations of a 0,5J UV Preionized Excimer Laser: *International Congress on Optical Science and Engineering*, septiembre 1988, Hamburgo, *SPIE Proceedings*, volumen 1023, conferencia 02.
- 18 G. L. Loper y M. D. Tabat: Submicrometer Resolution Etching of Integrated Circuit Materials with Laser-Generated Atomic Fluorine: *Journal of Applied Physics*, 1985, volumen 58, n° 9, pág. 3649.

Jean-Luc Peyre nació en 1962. Se graduó en física de materiales semiconductores por el Institut National Polytechnique de Grenoble en 1985 y obtuvo asimismo un Diplôme d'Etudes Approfondies en optoelectrónica. En 1986 ingresó en Laboratoires de Marcoussis, y actualmente trabaja en procesos químicos asistidos por láseres de excímeros.

Denis Rivière nació en 1951. Se graduó en ingeniería por el Institut d'Optique de Orsay, en 1975. Desde 1979 hasta 1985 trabajó como miembro del CNRS (Centro Nacional de Investigación Científica) y obtuvo el doctorado en físicas por la Universidad de París XI-Orsay, en 1984. Al año siguiente, el Dr. Rivière entró en el departamento de optoelectrónica de Laboratoires de Marcoussis, donde actualmente investiga en películas delgadas ópticas, láseres de excímeros y procesos fotoasistidos en microelectrónica.

Chantal Vannier nació en 1950. Obtuvo un Diplôme d'Etudes Supérieures de tecnología en el Conservatoire National des Arts et Métiers, París, 1978. Ingresó en el departamento de láseres de Laboratoires de Marcoussis en 1975. Desde 1982 hasta 1986, la Sra. Chantal trabajó en láseres de excímeros, dedicándose ahora a procesos químicos asistidos por láseres de excímeros para microelectrónica.

Gérard Villela nació en 1943. Obtuvo el Doctorat de Spécialité en espectroscopia y luminiscencia por la Universidad de Lyon. Ingresó en Laboratoires de Marcoussis en 1970, trabajando en crecimiento de monocristales y posteriormente en películas delgadas de silicio amorfo. Desde 1986, el Dr. Villela es responsable de un grupo que se dedica a películas delgadas ópticas para láseres de alta potencia y a procesos fotoasistidos en UV con láseres de excímeros, para microelectrónica.

Puertas ópticas para impresoras de alta resolución y gran velocidad

Las modernas impresoras láser ofrecen una alta calidad de textos y gráficos, pero un limitado potencial de desarrollo futuro. No obstante, se ha probado ya una cabeza de impresión de nueva tecnología basada en cerámica ferroeléctrica, que permite imprimir una gama de tonos y colores con alta resolución y elevado contraste.

R. Dorn

Centro de Investigación de Alcatel SEL,
Stuttgart, República Federal de Alemania

Introducción

La creciente complejidad y velocidad de los sistemas de conmutación y transmisión originará en los próximos años un aumento espectacular de la cantidad de datos transferida en todo el mundo. La mayoría de estos datos han de leerse en papel impreso, por lo cual van a necesitarse mejores medios de impresión, aptos para textos y gráficos y preferiblemente capaces de imprimir una gama de tonos y colores con alta resolución. En la actualidad no existen impresoras que ofrezcan prestaciones tan avanzadas.

Por más que se hable de la "oficina sin papeles", la tendencia actual es hacia un sensible aumento del material impreso y parece que así va a continuar a medio plazo. En consecuencia, las impresoras en color de alta calidad tienen un futuro prometedor. Aunque con las últimas impresoras láser y

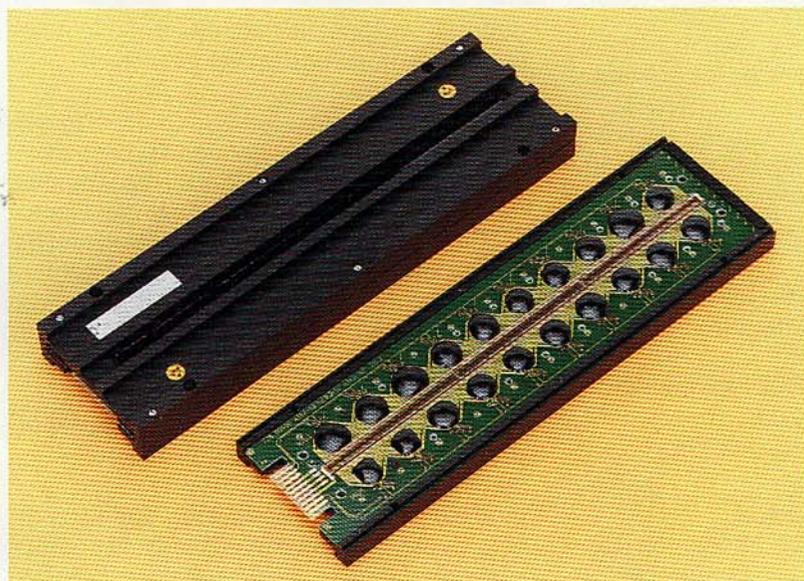
de chorro de tinta se ha mejorado mucho la calidad, sobre todo en blanco y negro, su potencial en el futuro está limitado. Por el contrario, las nuevas técnicas basadas en puertas de luz de PLZT* ofrecen posibilidades para el desarrollo de impresoras en color de alta velocidad, elevada resolución, fuerte contraste, rica gama tonal y formato casi ilimitado.

Requisitos funcionales de la impresión sin impacto

En un proceso ideal de impresión los datos almacenados electrónicamente se transfieren al papel sin pérdida de información y con calidad suficiente. En este contexto el término "suficiente" es difícil de definir, ya que depende no sólo de medidas absolutas sino de la experiencia y las expectativas del usuario. Así, durante muchos años ha sido esencial la calidad mecanográfica para los textos destinados a oficinas, y hasta hace muy poco tiempo solamente las máquinas de escribir electrónicas satisfacían estas exigencias. Por otra parte, para obtención de gráficos se han aceptado impresoras matriciales de baja calidad, ya que no había otras alternativas o eran muy costosas.

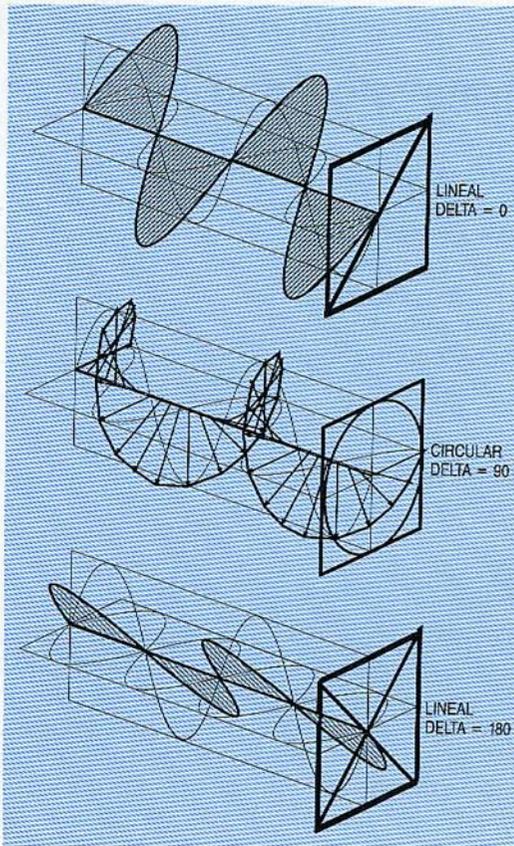
Al aparecer impresoras láser para oficinas a un precio moderado, la tecnología de impresión sin impacto comenzó a desplazar a las máquinas de escribir, pese a que las primeras impresoras daban una calidad de letra ligeramente inferior. Sin embargo, la conjunción de su bajo nivel de ruido, alta velocidad de salida, múltiples tipos de caracteres y capacidad de impresión de gráficos compensan sobradamente el

Cabeza de impresión PLZT para formato A4: (arriba) conjunto completo, (abajo) placa impresa con los PLZT y los circuitos integrados de alta tensión.



* El término PLZT denota una extensa gama de materiales cerámicos ferroeléctricos basados en el sistema plomo-lantano-zirconato-titanato.

Figura 1
Superposición ortogonal de ondas polarizadas linealmente con distintas diferencias de fase.



menor coste de las máquinas de escribir. La norma actual es la impresión en blanco y negro con resolución de 300 ppp (puntos por pulgada) y formato DIN A4.

Para aplicaciones futuras se ha de recordar que hasta las fotografías de calidad profesional, en la mayoría de los casos, resuelven menos de 4000 puntos en una dirección lineal, debido a las limitaciones de las lentes. En una página A4, esto corresponde a menos de 600 ppp. Para conseguir una calidad fotográfica es necesario añadir tonos intermedios (al menos 16) y pleno color.

Todas estas características se han comprobado en el laboratorio, y se introducirán en dispositivos comerciales en los próximos años. Con un fotorreceptor adecuado, las impresoras podrán dar una salida de calidad fotográfica, y alcanzar fácilmente los niveles del vídeo de alta definición.

Principios funcionales de las ordenaciones de puertas ópticas PLZT

La cabeza de impresión PLZT (plomo-lantano-zirconato-titanato) es un dispositivo óptico capaz de conmutar la luz.

Birrefringencia y luz polarizada

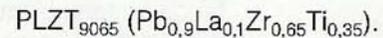
En la figura 1 se ilustran los conceptos de polarización lineal y circular, y los efectos

de las diferencias de fase entre ondas de luz polarizadas linealmente.

La velocidad de la luz en materiales transparentes no absorbentes está dada por el cociente de la velocidad en el vacío c por el índice de refracción del material n . A su vez, el índice de refracción puede depender de la dirección de propagación de la luz con respecto a la orientación del material y de la polarización de la onda luminosa. Se denominan birrefringentes los materiales que poseen esta propiedad, la cual puede provenir de anisotropía cristalográfica, de tensión mecánica o de campos eléctricos aplicados. Este último caso es de especial interés, ya que permite modificar eléctricamente las propiedades ópticas del material.

Propiedades del material PLZT

El PLZT es un material cerámico ferroeléctrico basado en el sistema plomo-lantano-zirconato-titanato. Las propiedades electroópticas de estos materiales pueden variarse en un amplio margen alterando su composición. Aquí sólo consideramos el material



Esta cerámica es transparente en un margen de longitudes de onda que abarca casi todo el espectro visible, lo cual la hace útil para aplicaciones en las que la neutralidad de color es importante. La absorción puede despreciarse y minimizarse las pérdidas de reflexión debidas al alto índice de refracción ($n = 2,5$) utilizando recubrimientos antirreflextantes.

Aunque el material es casi isotrópico ópticamente, se convierte en birrefringente ante un campo eléctrico. El índice de refracción para la luz polarizada paralela al campo eléctrico se incrementa en un valor proporcional al cuadrado del campo eléctrico E :

$$\Delta n = n_s - n_o = -0,5 n_s^3 R E^2$$

donde R es el coeficiente electroóptico cuadrático que tiene un valor típico de $0,8 \times 10^{-16} \text{ m}^2\text{V}^{-2}$.

Pese a su carácter ferroeléctrico, el material presenta sólo una pequeña histéresis (ciclo muy estrecho), no conservando polarización interna tras retirar el campo. Como la polarización sólo implica reorientación de los cristales, se produce con suma rapidez, lo cual es importante para la modulación de la luz. Se han conseguido velocidades de conmutación intrínsecas de 10 ns.

En la mayoría de las aplicaciones prácticas, la velocidad de conmutación es menor porque la corriente de control que debe suministrar la carga eléctrica de desplazamiento usualmente es limitada. Dicha carga es proporcional a la capacidad de la puerta e inversamente proporcional a la anchura

del impulso; dada la elevada constante dieléctrica de 5000, puede necesitarse para controlar una puerta de luz mayor carga que la requerida para otras aplicaciones con electrodos de película delgada.

Principio funcional de un conmutador óptico PLZT

Se colocan dos polarizadores con ejes ortogonales en un haz paralelo de luz no polarizada (Fig. 2). Como el primer polarizador polariza linealmente la luz, ésta no podrá atravesar el segundo, situado en posición cruzada. Insertando un bloque de material PLZT entre ambos polarizadores la situación no cambia, pero si se aplica a la cerámica un campo eléctrico orthogonal al haz luminoso, formando un ángulo de 45° con el eje del polarizador, el material se vuelve birrefringente y modifica el estado de polarización de la luz que lo atraviesa.

El campo óptico del haz de polarización lineal puede considerarse compuesto por dos ondas polarizadas ortogonalmente, una paralela y otra perpendicular al campo eléctrico. La birrefringencia inducida eléctricamente introduce un desfase entre las dos componentes. Adaptando la intensidad del campo eléctrico al espesor del material, puede retardarse una de las ondas en media longitud de onda, haciendo así girar 90° el plano de polarización. En consecuencia, el segundo polarizador ya no bloquea el paso de la luz, y el conmutador birrefringente está en "conducción" (on).

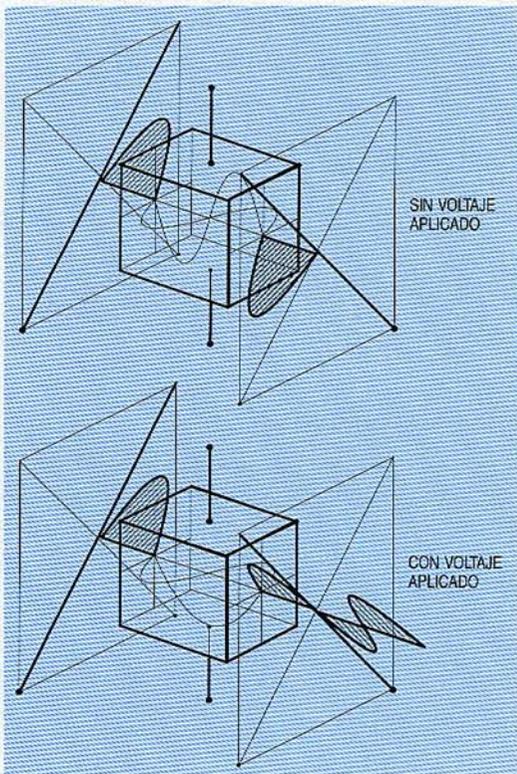


Figura 2
Principios de la conmutación de luz mediante birrefringencia inducida eléctricamente.

Estructura de los electrodos en las ordenaciones de puertas ópticas

Un solo conmutador (puerta óptica) es de poca utilidad para aplicaciones en impresoras. Sólo puede conseguirse una alta densidad espacial de puertas con una estructura planar realizada mediante tecnología de película delgada. La estructura lineal de puertas ópticas viene definida por unos electrodos de oro sobre una lámina rectangular de PLZT. A veces se requiere un electrodo en la parte posterior para modificar la distribución del campo, practicándose en él unas aberturas que se enfocan al fotorreceptor.

La aplicación de una tensión a una estructura planar de electrodos no equivale exactamente al caso de una puerta única, al no ser ya el campo homogéneo en todo el espesor de la cerámica. Además, todavía más importantes son las variaciones planares de la intensidad de campo dentro de una puerta óptica concreta; el campo es elevado en las proximidades de los electrodos y disminuye hacia el centro de la puerta. La luz que pasa cerca de los electrodos sufre un retardo de fase diferente al de la luz que atraviesa el centro, por lo cual no toda la luz que cruza la puerta se retarda en media longitud de onda. La pérdida de transmisión del dispositivo es mayor que la pérdida de dos polarizadores de la misma orientación.

Circuitos de excitación

En principio, podrían calcularse las tensiones requeridas a partir de las propiedades del material si se conociera la distribución tridimensional del campo eléctrico. Sin embargo, ello no es posible por la asimetría de la disposición planar. Sobre bases empíricas, la tensión requerida para producir un retardo de media longitud de onda viene dada por:

$$V_s = 17,5 \times d^{0,5} \text{ [V]}$$

donde d es la anchura de la puerta en μm .

Así, una cabeza de impresión para 300 ppp de resolución requiere unos 180 V, mientras que 120 V son suficientes para una resolución de 600 ppp. En el mercado sólo hay escasos – y costosos – circuitos integrados capaces de manejar tensiones tan altas, y hasta hace muy poco ninguno de ellos conmutaba ambas polaridades. Las puertas no activadas no están conectadas a una tensión fija, y por tanto los campos eléctricos parásitos de elementos adyacentes interfieren la transmisión de luz (diafonía entre pixels contiguos).

• Como para la impresión en blanco y negro no se necesita el alto contraste que puede lograrse con la cabeza de impresión

PLZT, se ha desarrollado un circuito excitador múltiple (Fig. 3) merced al cual se reduce a la mitad el número de circuitos integrados de alta tensión requeridos, aunque a costa de reducir apreciablemente la relación de contraste y duplicar el tiempo de impresión. Además también se divide por dos la densidad de conductores en la placa de circuito impreso.

Uno de los electrodos de un par de puertas ópticas colindantes se conecta alternativamente a una de las dos líneas de alimentación. En un ciclo, una de las líneas lleva toda la tensión de conmutación V mientras que la otra lleva $V/3$; en el siguiente ciclo se intercambian las tensiones. Se utilizan conmutadores de circuito integrado para conectar a tierra los otros electrodos de los pares de pixels, no accionados conjuntamente desde la tensión de suministro. Estos conmutadores son actuados por señales de datos procedentes de registros de desplazamiento. Todas las puertas conectadas al electrodo de $V/3$ se polarizan a $V/3$ sea cual fuere la señal de datos, mientras que las puertas conectadas a tensión V se polarizan a V si el conmutador está activado, o a $V/3$ si está desactivado. Se reduce así el contraste máximo al polarizarse la puerta a $V/3$, incluso en el estado de "no conducción" (*off*).

Montaje del dispositivo

Mediante técnicas de película delgada se aplican a una lámina de PLZT los electrodos y las capas antirreflectantes para nueve líneas de puertas. Las estructuras se definen por fotolitografía, y luego se separan las líneas individuales y se montan en una placa de circuito impreso que incluye la tensión de alimentación y las líneas de señales de datos, así como los circuitos integrados de alta tensión montados mediante soldadura automática por cinta. Los formatos de las líneas de puertas de más de 70 mm de ancho requieren el ensamblado preciso de varias líneas PLZT. Los polarizadores se colocan en la cápsula antes de insertar la placa. Si el usuario lo requiere, puede añadirse un sistema formador de imagen.

Características del dispositivo

La fabricación de cabezas de impresión PLZT para blanco y negro se ha transferido a Alcatel SEL. No obstante, en laboratorios de investigación se ha demostrado que estas cabezas pueden imprimir en tonos intermedios, siendo así la base de una futura familia de cabezas de impresión de alta calidad.

Situación

En los últimos años, las impresoras sin impacto habían de demostrar que pueden dar una calidad equivalente a la mecanográfica, y por consiguiente la resolución ha sido el principal parámetro. Se estima que dicha calidad se consigue con 300 ppp de resolución, como ofrecen la mayoría de las impresoras láser del mercado actuales. Existen ya cabezas PLZT con resoluciones de 300 y 400 ppp, sea como productos o como muestras, habiéndose realizado en el Centro de Investigación de Alcatel SEL la primera ordenación de puertas ópticas de 600 ppp.

La relación de contraste K viene determinada por la estructura de los electrodos, los circuitos de excitación, las características de los polarizadores, el sistema de iluminación y la óptica. Antes de envejecer, el conmutador PLZT con polarizadores tiene una relación de contraste $K(V,0)$ de más de 400 y $K(V,V/3)$ de más de 40. En funcionamiento, la relación de contraste decrece al aumentar la transmisión en el estado de no conducción. Aunque esta reducción no afecta demasiado al comportamiento en aplicaciones de blanco y negro, es un inconveniente a superar cuando se imprime en gama tonal. Una óptica con lente SELFOC limita el margen utilizable a $K = 10$ para 300 ppp, y $K = 3,5$ para 600 ppp. Aunque

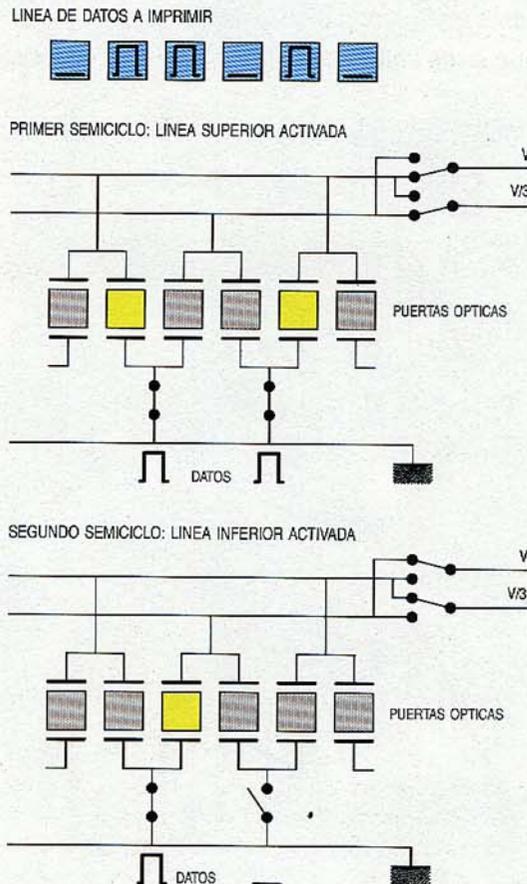


Figura 3
Esquema de control múltiple de una ordenación de puertas ópticas PLZT.

esto sea suficiente para imprimir textos por un proceso xerográfico, las prestaciones pueden mejorar espectacularmente utilizando lentes discretas.

El rendimiento del proceso de conmutación limita la transmisión de luz en el estado de conducción a un 38% aproximadamente (50% en un polarizador ideal, con 75% de rendimiento). Sin embargo los polarizadores reales, utilizables en un amplio margen espectral, reducen la transmisión de luz en un 12% más, de manera que en el caso de un haz de rayos paralelos sólo se transmite un 33% de la luz incidente en una puerta óptica en estado de conducción. Con una fuente de luz de 250 W y una cabeza para formato A4, la iluminación y la óptica reducen aún más la luz transmitida, dejando una intensidad de unos 30 mW/cm². Con la sensibilidad de un tambor de selenio (1 μ Ws/cm²), se emplean 30 μ s en iluminar una línea. Como en la página A4 hay unas 7500 líneas de 600 ppp, se tarda unos 0,25 s en iluminar una página, de no haber otros factores de reducción. Al contrario que en los sistemas en los que una fuente de luz única barre toda la anchura del papel (ej., impresoras láser), la velocidad de impresión de las ordenaciones de puertas ópticas no decrece al utilizar ordenaciones mayores.

Actualmente la velocidad de impresión no está limitada por la iluminación. La duración de un ciclo del registro de desplazamiento es de 0,2 μ s, por lo que se tarda 0,5 ms en cargar una línea completa para una cabeza A4 de 600 ppp si los datos se envían en serie, resultando 3,5 s para una página A4 en blanco y negro a 600 ppp. Utilizando un bus paralelo de 16 bit, esto se reduciría a 0,2 s.

En principio, el tamaño de la línea de impresión es ilimitado, ya que pueden ensamblarse un gran número de elementos PLZT en formato arbitrario. Por ejemplo, existe una cabeza A3 de 300 ppp como producto calificado, y el Centro de Investigación de Alcatel SEL ha obtenido el tamaño A2 a petición de un cliente. Especialmente en las cabezas de gran formato, quedan problemas por resolver como la estabilidad mecánica y las diferencias en los coeficientes de dilatación de la PLZT, la placa de circuito impreso y el encapsulado.

La impresión de alta calidad en gama tonal requiere una escala lineal de 16 a 64 tonos de grises sobre el papel. Para compensar la sensibilidad no lineal de los fotorreceptores, se han de generar electrónicamente 256 tonos intermedios. La forma más simple de realizarlo es dividiendo cada ciclo de impresión en 256 segmentos de tiempo. Cada punto se ilumina durante el periodo que corresponde a la densidad

requerida. Además, las diferencias en atenuación óptica entre las diferentes puertas pueden compensarse mediante la corrección electrónica de los pixels. No obstante, aun sin corrección, puede conseguirse una calidad aceptable.

Perspectivas

Las ventajas técnicas de las ordenaciones de puertas PLZT son de especial importan-



Impresión semitonal realizada con una cabeza de impresión PLZT.

cia en la impresión en color de alta calidad. La resolución requerida de 600 ppp se ha conseguido ya en el laboratorio, y se ha demostrado la posibilidad de tonos intermedios, aunque debe proseguir el desarrollo para superar la degradación de la relación de contraste que produce el envejecimiento. El Centro de Investigación de Alcatel SEL ha demostrado también que esto es posible. El color se convierte entonces en un problema electrónico, en el que no se prevén grandes obstáculos.

Con la electrónica de multiplexación antes descrita no se puede conseguir una alta relación de contraste. Se necesita conmutar desde cero hasta la tensión total, y por ello habrá que rediseñar los circuitos de excitación. Para contrarrestar el aumento

Tabla 1 – Ventajas de las ordenaciones de puertas PLZT

Parámetro	Aventaja a:
Todos los colores a la vez	Láser, LED
Alta velocidad mediante direccionamiento paralelo	Láser, chorro de tinta
Resolución extrema, > 600 ppp	Chorro de tinta, térmica, LED
Alto contraste	LCD
Tonos intermedios	Chorro de tinta, LCD
Tamaño ilimitado	Láser, térmica, LCD

de costes debido a la duplicación del número de circuitos integrados de alta tensión, se estudian transistores de alta tensión de película delgada como alternativa a los circuitos integrados costosos, buscando el hacer competitivas las cabezas PLZT.

La división del ciclo de impresión en segmentos de tiempo para producir tonos intermedios aumenta el tiempo de carga de los registros de desplazamiento, por lo que se habrán de cargar en paralelo los registros individuales. Basado en los valores dados anteriormente y en un fotorreceptor con sensibilidad de 10 nWs/cm^2 (película), podría conseguirse una velocidad de impresión en color de media página A4 por segundo. Con fuentes de luz de mayor potencia, podría incluso realizarse una impresión xerográfica en color en menos de un minuto, pese a su menor sensibilidad.

Para satisfacer la necesidad de diversos formatos que sienten los usuarios, se estudia la viabilidad de utilizar bloques modulares. Además, el uso de vidrio en lugar de plástico como material básico de la placa de circuito impreso, simplificaría el montaje y ofrecería un mejor coeficiente de dilatación térmica.

Tecnologías competidoras

Dispositivos no ópticos

La transferencia térmica y los procesos de inyección de tinta son las principales tecnologías sin impacto competidoras. En ambos casos, la tinta se transfiere térmicamente desde una lámina metálica o boquilla al papel. Es dudoso que con ninguna de estas técnicas pueda conseguirse impresión en color y tonos intermedios a gran velocidad

con resolución mayor de 600 ppp. Además el proceso de transferencia térmica implica un alto coste de materiales.

Cabezas de impresión óptica

En impresoras láser y LED se utilizan fuentes de luz directamente moduladas, que en ambos tipos requieren un fotorreceptor sensible al infrarrojo cercano. El color sólo puede conseguirse por impresión múltiple con transferencia del pigmento ("toner"). En formatos mayores pueden aparecer problemas relativos a la precisión mecánica y la velocidad de impresión, dada la serialidad del método de impresión láser con fuente única.

Como conmutadores de luz pueden utilizarse obturadores de cristal líquido en lugar de ordenaciones de puertas PLZT, quedando asegurada la neutralidad de color por ser transparentes en todo el espectro visible. Aunque no se ha demostrado aún la viabilidad de conseguir 600 ppp, tampoco puede excluirse de antemano. La relación de contraste está limitada a alrededor de 10 con circuitos de excitación sencillos, pero puede llegarse a 50 integrando transistores conmutadores de película delgada en los elementos individuales de la matriz, con objeto de evitar caídas de tensión durante el periodo de desactivación. La velocidad de conmutación es muy inferior a la de la PLZT, lo cual limita sus prestaciones para los tonos intermedios, necesitando nuevas tecnologías celulares para conseguir formatos mayores.

Conclusiones

Se están produciendo ordenaciones de puertas ópticas PLZT con excelentes propiedades para aplicaciones en blanco y negro, y que han demostrado ampliamente su capacidad de imprimir en tonos intermedios y en color. Las ventajas de esta tecnología (Tabla 1) comparada con las alternativas actuales le auguran un futuro prometedor.

Reimund Dorn nació en 1946 en Gelsenkirchen, Alemania. Estudió ciencias físicas en RWTH, Aquisgrán, donde recibió el grado Dipl-Phys en 1973, y el Dr-Rer-Nat en 1976. Al año siguiente ingresó en el Centro de Investigación de Alcatel SEL para trabajar en el campo de los transductores optoelectrónicos basados en InP. En la actualidad, el Dr. Dorn dirige la división de fibras ópticas y materiales básicos del Centro de Investigación mencionado.

Tecnologías de las preformas para fibras ópticas

El esperado incremento de la demanda de fibras ópticas monomodo de alta calidad exige conseguir procesos de producción de preformas más económicos, capaces de sustituir a los actuales. Alcatel se dedica intensamente tanto a la mejora de los procesos de producción como al desarrollo de alternativas nuevas y prometedoras

R. Dorn

Centro de Investigación de Alcatel SEL,
Stuttgart, República Federal de Alemania

C. Le Sergent

Laboratoires de Marcoussis, Marcoussis,
Francia

Introducción

En términos generales, las fibras ópticas son largos guíasondas cilíndricos con atenuación extremadamente baja en la dirección axial. La guía de luz está formada por una región central, el núcleo, cuyo índice de refracción es ligeramente superior al de la región coaxial externa (envoltura). Según sea la longitud de onda, la diferencia de índices de refracción, el perfil del índice de refracción y el diámetro del núcleo, la fibra podrá guiar uno o más modos del campo eléctrico. Las fibras ópticas monomodo son la solución más razonable para transmisión por la red de enlaces y las líneas de abonado. La potencia óptica se concentra en el núcleo de la fibra, aunque una cierta propor-

ción penetra en la parte interior de la envoltura. Esta región activa constituye sólo el 10% del volumen total de la fibra (Fig. 1).

Se utiliza hoy la sílice como material básico, dados los requisitos de atenuación y dispersión, la disponibilidad de fuentes y detectores de luz adecuados, y la viabilidad de las primeras experiencias tecnológicas. El índice de refracción de la sílice puede variarse en un amplio margen mediante el dopado con germanio, fósforo y últimamente con flúor.

En todos los procesos principales de fabricación de fibras ópticas de bajas pérdidas, se pasa por dos etapas:

- preparación de la preforma, que es una barra de cuarzo de alta pureza con el perfil de índice de refracción requerido
- estirado de la fibra a partir de la preforma.

El trabajo de investigación y desarrollo se concentra fuertemente en la preforma por ser ésta el principal determinante de las características de la fibra y de los costes de producción, aún más importantes para el futuro. Se han preparado diversos procedimientos de deposición química en fase de vapor (CVD) para conseguir los altos niveles de pureza requeridos. En algunos de ellos se han alcanzado prácticamente los límites teóricos de atenuación fijados por la dispersión de Rayleigh. No obstante, la esperada introducción de la tecnología de fibras ópticas en el bucle de abonado abrirá un gran mercado, que rebasará en mucho la capacidad de producción actual. Así, la investigación se orienta ahora a reducir los costes de producción, bien mejorando las técnicas existentes, o bien desarrollando nuevos procesos de producción.

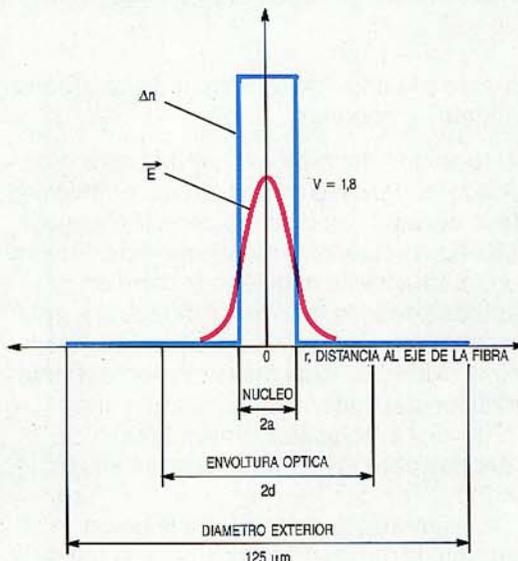
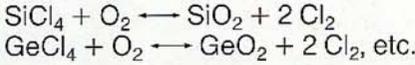


Figura 1
Distribución de índice de refracción y de campo eléctrico en una estructura monomodo esquemática.

Procesos de producción para preformas de fibras ópticas

Los procesos de producción actuales están basados en la sílice dopada por CVD según las reacciones:



Los requisitos de pureza (milésimas de parte por millón), pueden lograrse con relativa facilidad utilizando reactivos existentes en el mercado. La termoquímica ofrece para ello dos factores favorables:

- las impurezas de los metales de transición se transforman en cloruros volátiles a la temperatura de deposición, lo que provoca su expulsión del material
- el cloro producido en la reacción arrastra los residuos de agua.

Existen dos clases de procesos: los que utilizan un tubo como sustrato y los que no lo utilizan (Fig. 2).

Deposición en el interior de un tubo

Partiendo de un tubo comercial de sílice, se depositan en su interior en sucesivas capas la envoltura óptica y el núcleo, que se sintetizan inmediatamente después de su deposición para obtener capas vidriadas exentas de burbujas. Finalmente, el tubo se colapsa y se convierte en una barra maciza. A veces puede necesitarse un sobrerrevestimiento para conseguir la adecuada relación de los diámetros exterior y del núcleo.

Como indica la figura 2, por el interior del tubo de sílice se hace circular una mezcla de reactivos exactamente dosificada. Desplazando a lo largo del eje del tubo un quemador o un campo electromagnético generador de plasma, se aumenta su temperatura lo suficiente para producir la reacción local deseada. La deposición por capas permite ajustar con precisión el perfil de índice de refracción graduando las proporciones de reactivos. En la figura 3 se ilustran algunos perfiles típicos de índice de refracción, incluyendo los adoptados en enlaces recientemente instalados por Alcatel.

El tubo utilizado como sustrato para la CVD no tiene requisitos muy exigentes de transparencia, ya que no interviene en la propagación de la luz. Sin embargo, deben observarse las inclusiones e imperfecciones geométricas (elipticidad, curvatura, etc.), que influyen en las pérdidas de conexión y en la resistencia mecánica.

Las técnicas de deposición de materiales en el interior de un tubo, son inherentemente asimétricas por haber una entrada y una salida. En consecuencia, se produce una falta de homogeneidad axial, especial-

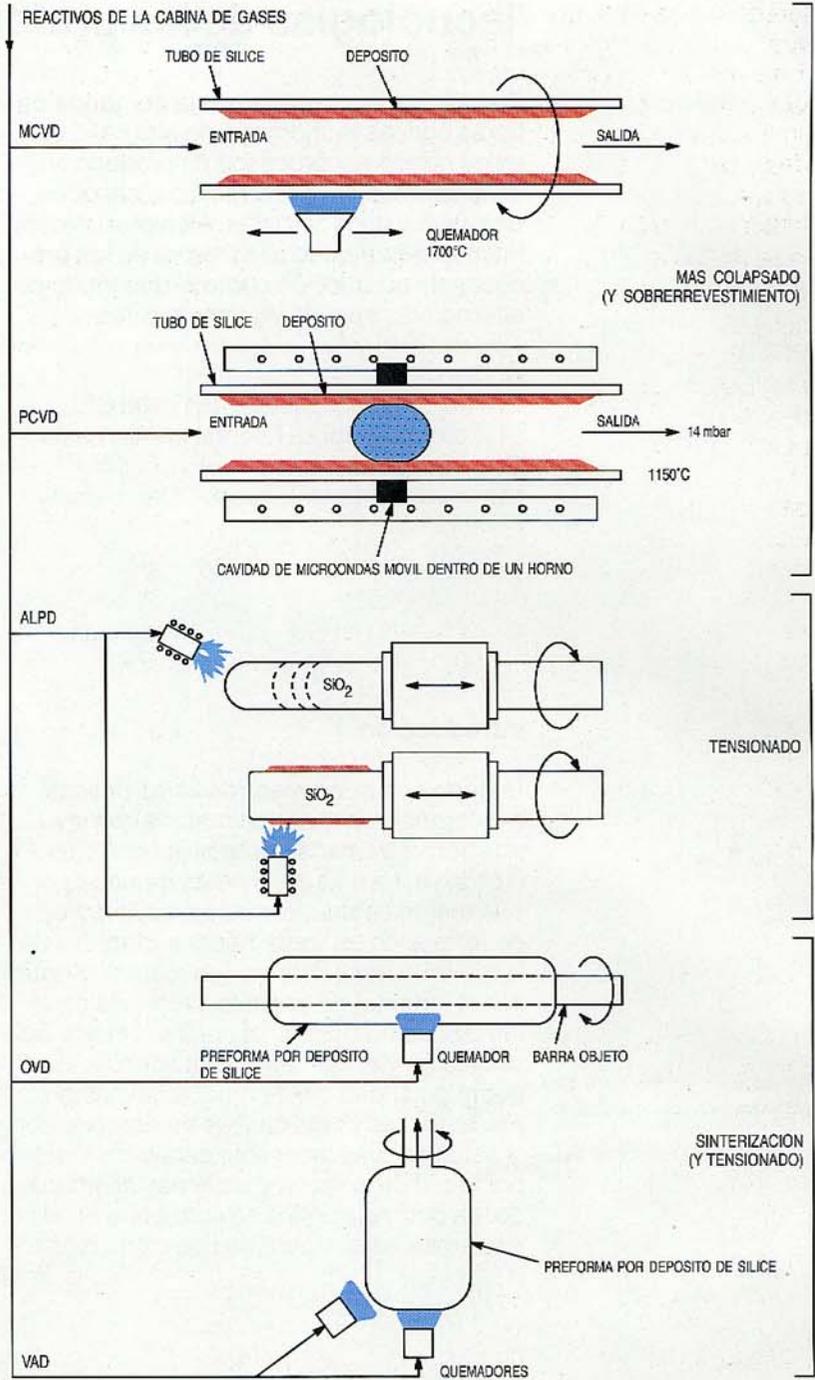


Figura 2 Procesos actuales de fabricación de preformas por CVD.

mente a la entrada, denominada "estrechamiento" (*tapering*).

Deposición química en fase de vapor modificada: el proceso de deposición química en fase de vapor modificado, también llamada MCVD, es la técnica más extendida. En ella, un quemador de oxhídrico recorre en ambos sentidos el exterior del tubo, suministrándole la energía necesaria para producir la oxidación local más la inmediata sinterización del material depositado a unos 1700°C y el colapsado final a 2000°C, ambos sobre el mismo torno de trabajar vidrio.

El aumento de espesor de la pared durante la deposición entorpece la trans-

ferencia de la energía necesaria a los reactivos, y obliga a que el depósito no pase de 1 mm de espesor aproximadamente. La velocidad del colapsado se ve también limitada por el riesgo de aumentar la elipticidad y la excentricidad. De una preforma suelen obtenerse 20 a 40 km de fibra por el tratamiento MCVD.

Deposición química en fase de vapor por plasma: las diferencias más señaladas entre esta técnica (identificada por las siglas PCVD) y la MCVD consisten en utilizar una cavidad de microondas móvil generadora de plasma en lugar de un quemador, y en que la presión de trabajo es menor (14 mbar). El tubo se calienta a unos 1100°C para asegurar una deposición exenta de cloro y se colapsa en una máquina separada.

La rápida transferencia de energía a través de las paredes del tubo permite desplazar con rapidez la zona de reacción, dando lugar a capas delgadas que mejoran la definición del perfil. A la temperatura de la pared, relativamente baja, se depositan casi todas las partículas de óxido producidas, lo que da un rendimiento de material mucho mejor que en la MCVD. La capacidad que se da como normal es de 30 km de fibra por preforma.

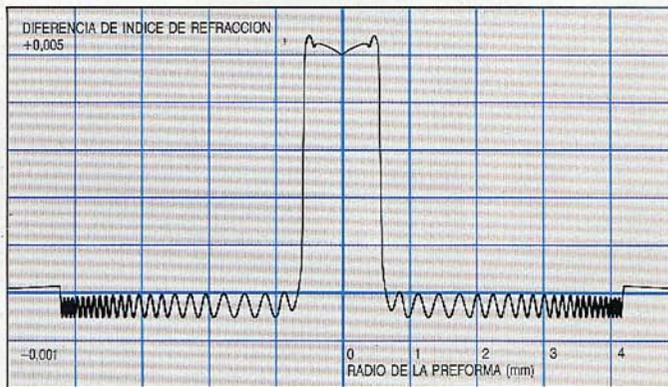
Técnicas no basadas en tubo

En ciertas técnicas se sintetiza la preforma de vidrio entera — no sólo la parte activa —, aunque sólo dos de ellas se aplican a la producción de fibras ópticas para telecomunicación. Al contrario que en las técnicas que utilizan tubo, el material de sílice permanece poroso hasta el final del proceso de deposición. La transparencia se consigue mediante sinterización, tras haber eliminado por cloración los grupos oxidrilos. A primera vista, añadir una nueva etapa de producción parece un serio obstáculo, pero se ha demostrado que, frente a las técnicas basadas en tubo, ofrece una eliminación casi total de los grupos OH.

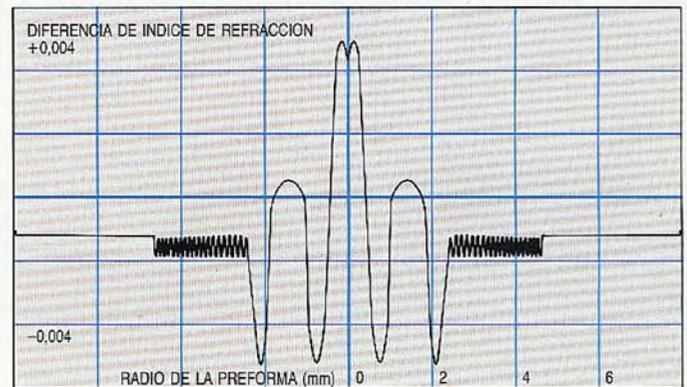
Oxidación externa en fase de vapor: este proceso (OVPO) es, junto con la MCVD, el más antiguo de todos los procesos de producción. Consiste en oxidar los cloruros en un quemador oxhídrico, depositándose en sentido ortogonal las partículas de sílice, el "hollín", en un sustrato de grafito o cuarzo montado horizontalmente en un torno de trabajar vidrio. Igual que en la MCVD, el mecanismo de deposición es la termoforesis, que da un rendimiento de deposición tan sólo del 50%. A temperatura del sustrato de 1000°C, las partículas de sílice se agrupan a modo de preforma porosa. Se

Figura 3
Perfiles monomodo
ajustados por MCVD
(cortesía de las Compañías o Laboratorios de Alcatel).

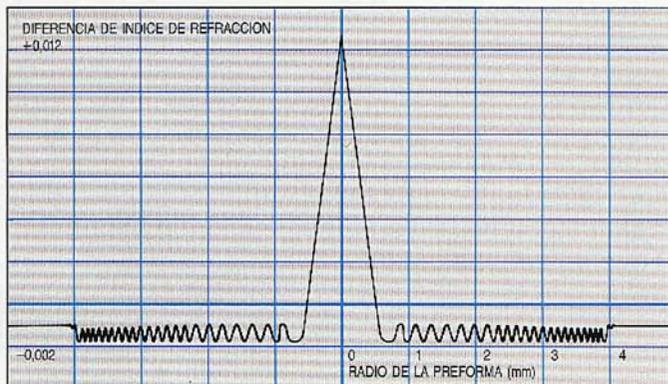
(a) ENVOLTURA ADAPTADA



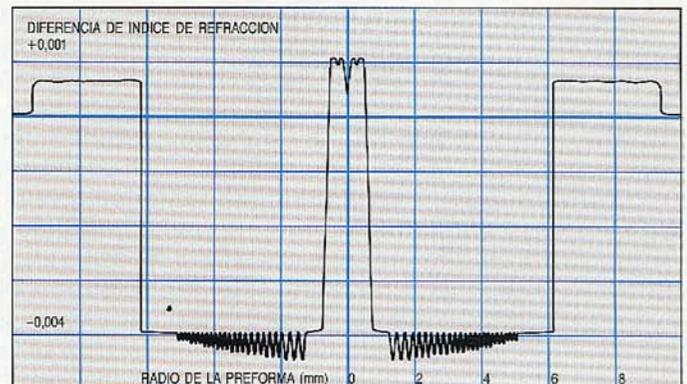
(c) DISPERSION APLANADA



(b) DISPERSION DESPLAZADA



(d) NUCLEO SIN DOPAR



han conseguido velocidades de deposición de más de 10 g/min.

Debido a las diferencias de coeficiente de dilatación, al terminar la deposición la barra central del sustrato puede desprenderse del material poroso para dejar un orificio axial que se cerrará durante la sinterización o el estirado de la fibra. Se han conseguido tamaños máximos de preforma equivalentes a más de 300 km de fibra. Tras la deposición, el material contiene hasta varios centenares de partes por millón de grupos OH, que desaparecen casi totalmente por tratamiento térmico a menos de 700°C, dejando concentraciones de OH de algunas partes por millón. Aplicando cloro a temperatura entre 1000 y 1200°C, pasan a clorhídrico, el cual puede eliminarse de la preforma antes de la sinterización. Ello es extremadamente eficaz, y da a este tipo de procesos una considerable ventaja en cuanto al contenido en OH de la fibra.

El proceso de sinterización, con gradientes de temperatura superiores a 100°C/cm a un máximo de 1500 a 1600°C, produce preformas transparentes, las cuales se tensionan para reducir su diámetro y luego se estiran para obtener la fibra. Pueden producirse así todos los tipos de fibra, siendo el germanio el dopante preferido.

Deposición axial en fase de vapor: el VAD es el más moderno de los procesos "estándar". Fue concebido en Japón, inicialmente para la fabricación de fibras de índice gradual. El proceso químico de producción de partículas de sílice es idéntico al del método OVPO. La deposición del núcleo comienza longitudinalmente sobre un sustrato auxiliar, y a medida que el sustrato se separa del quemador la preforma se va alargando en sentido axial. El material de la envoltura se añade al del núcleo desde uno o más quemadores adicionales inclinados entre 0 y 30°C con respecto al eje de la preforma. Pueden así alcanzarse velocidades de deposición de 10 g/min, y preformas de hasta 600 km de fibra.

El resto del proceso es similar o idéntico a los procedimientos de OVPO.

Deposición lateral y axial por plasma (ALPD): la técnica ALPD, y la de deposición externa por plasma relacionada con ella, se desarrollaron en Francia y Alemania sobre la base de un principio sencillo, ilustrado en la figura 2. Se introduce directamente SiCl₄ (o polvo de SiO₂) en un quemador de RF a presión atmosférica, a temperatura de varios miles de grados centígrados. La sílice resultante se deposita, bien en dirección axial sobre un sustrato que se retira lentamente, o bien lateralmente sobre una barra de sílice que más tarde se convertirá en el núcleo óptico. El vidrio, exento de

burbujas de aire, se sintetiza directamente en una preforma "preparada para tensar", o "preparada para estirar", sin necesidad de fase de colapsado ni de consolidación. Es un interesante proceso de una sola etapa para la fabricación de fibras especiales.

Análisis comparativo de características

Con los procesos de deposición externa por plasma, se producen fibras con pérdidas bastantes mayores que con otras técnicas (de 1 a 2 dB/km para 1300 nm), lo cual limita su uso a la fabricación de fibras ópticas especiales o de tubos.

Las pérdidas medias conseguidas con las técnicas MCVD, PCVD, OVPO y VAD se aproximan a 0,35–0,38 dB/km para 1300 nm, y a 0,19–0,21 dB/km en los 1550 nm. En esta última longitud de onda el valor óptimo conseguido es de 0,15 dB/km, valor cercano al límite intrínseco del material. Extender la comparación a otros parámetros, tales como la flexibilidad del proceso, la resistencia mecánica y las tolerancias geométricas, conduciría a un factor de calidad global aproximadamente igual en estos cuatro procesos principales.

Una mayor capacidad de producción de preformas ayuda a reducir los costes. En este terreno, los procesos OVPO y VAD con preformas de más de 100 km de fibra aventajan en un factor aproximado de tres a los MCVD y PCVD. Aunque no es directamente comparable, el proceso óptimo en este aspecto es el ALPD, que puede conseguir más de 1000 km de fibra.

Las técnicas no basadas en tubo ofrecen también una alta velocidad de deposición, con resultados que superan los 10 g/min (3 a 6 g/min para ALPD). Esto contrasta con los 3 g/min del PCVD y los 2 g/min del MCVD. La velocidad de deposición tiene menos importancia para los procesos internos, ya que en ellos sólo ha de depositarse alrededor del 10% del material.

La escasez de datos publicados sobre colapsado o sobrerrevestimiento en los procesos basados en tubo, o sobre la consolidación de preformas por depósito de partículas de sílice, dificulta la evaluación de la eficiencia global del proceso, debiendo además considerar los inevitables porcentajes de desecho.

Investigación sobre tecnologías de la próxima generación

Hasta ahora la investigación se dirige primordialmente a optimizar las características técnicas de las fibras ópticas. En el futuro, sin embargo, se orientará cada vez más a reducir los costes de producción sin degradar las prestaciones. Los principales facto-

res van a ser el rendimiento de la producción, el precio de la materia prima, el aprovechamiento del material, los costes laborales (tamaño de preforma, velocidad de producción, etc.), y la amortización de la maquinaria.

Los centros de investigación del grupo Alcatel trabajan intensamente en diferentes direcciones, desde el perfeccionamiento de los procesos convencionales hasta el desarrollo de otros nuevos procesos.

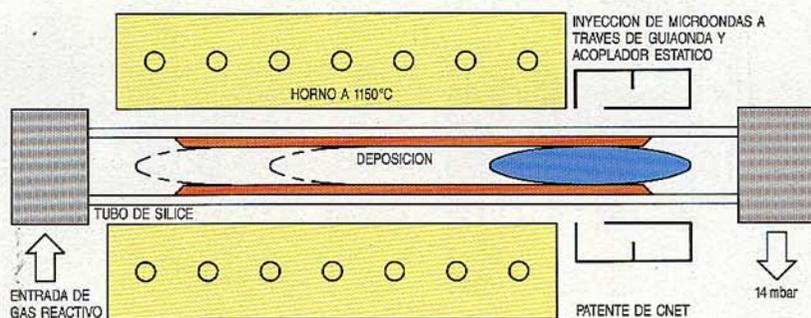


Figura 4
Esquema del proceso SPCVD.

Deposición interna sobre tubo

Durante varios años se ha intentado hacer más rentable el proceso MCVD añadiendo un plasma atmosférico al quemador oxhídrico (plasma-MCVD). Se ha aumentado así considerablemente la velocidad de deposición y el tamaño de las preformas, aunque a costa de degradar los parámetros de las fibras ópticas. Es pues dudoso que pueda utilizarse el método PMCVD para producción en el futuro.

Los estudios que se han emprendido en los laboratorios de Alcatel apuntan a producir preformas mayores y menos costosas. Para conseguirlo se necesita encontrar los medios para:

- incrementar las velocidades de deposición y de colapsado
- implantar depósitos CVD en el interior de tubos de gran diámetro y pared gruesa, y, en general, solucionar el problema de transferencia térmica que conlleva el uso de tales tubos
- minimizar la relación de materiales depósito/tubo.

Respecto al último problema, parece importante la próxima aparición de tubos de sílice sintética con bajo contenido en agua y pequeñas pérdidas (algunos dB/km), que se podrían utilizar como envoltura óptica exterior. El material depositado por CVD sólo se necesitaría entonces para el núcleo y la envoltura interna, reduciendo así el tiempo de deposición alrededor de cinco veces al utilizar relación $r/a = 2$ en lugar de

$r/a = 5$ (Fig. 1). Los costes de producción bajarán cuando se implanten los nuevos procesos para producir los tubos (p. ej., deposición externa por plasma, hidrólisis de gel). Este prometedor enfoque ha animado a Laboratoires de Marcoussis a estudiar técnicas que utilicen menos material depositado pero en tubos de alta calidad, con miras a desarrollar a corto plazo un proceso MCVD mejorado, y a largo plazo un proceso simplificado de deposición por plasma.

Super-MCVD: puede esperarse que el incremento de productividad más notable provenga de aumentar la capacidad de las preformas y la velocidad de colapsado. Los tiempos de colapsado probablemente pueden reducirse a la quinta parte. En cuanto al aumento de capacidad, se conseguirá por:

- una reducción de la proporción de material depositado por CVD, desde un 10% hasta un 2% aproximadamente
- un mayor grosor de depósitos merced a un mejor control del proceso
- un rápido recubrimiento de la preforma primaria (se han alcanzado ya los 50 mm de diámetro) como alternativa a las técnicas de deposición.

Deposición química en fase de vapor por plasma de onda superficial (SPCVD): una ventaja inherente de la utilización de microondas en lugar de calor, es que se transmite mejor la energía a través de un medio dieléctrico, como un tubo grueso. Se ha propuesto varias veces en los últimos años el uso de un sencillo aplicador estático en frío en lugar de la cavidad de microondas PCVD, que ha de ir de un lado a otro a 1100°C (Fig. 2).

Una de las técnicas más prometedoras utiliza una onda superficial para inducir el plasma activador (Fig. 4). La energía de microondas se acopla al tubo por un extremo, y los reactivos se introducen por el otro. El depósito se forma sobre el frente de la columna de plasma, cuya longitud se modula eléctricamente. Se han conseguido así atenuaciones del orden de 0,4 a 0,7 dB/km a 1300 nm. Asimismo se ha fabricado una preforma con capacidad de 90 km de fibra (150 km por metro de preforma) por deposición SPCVD en el interior de un tubo de sílice seca de 25/19 mm, con el recubrimiento subsiguiente para obtener una preforma de 50 mm de diámetro.

Merece la pena intentar la realización de tubos más anchos y gruesos, y para ello puede interesar combinar la técnica SPCVD con la ALPD en un atractivo proceso híbrido de deposición de "plasma externo e interno".

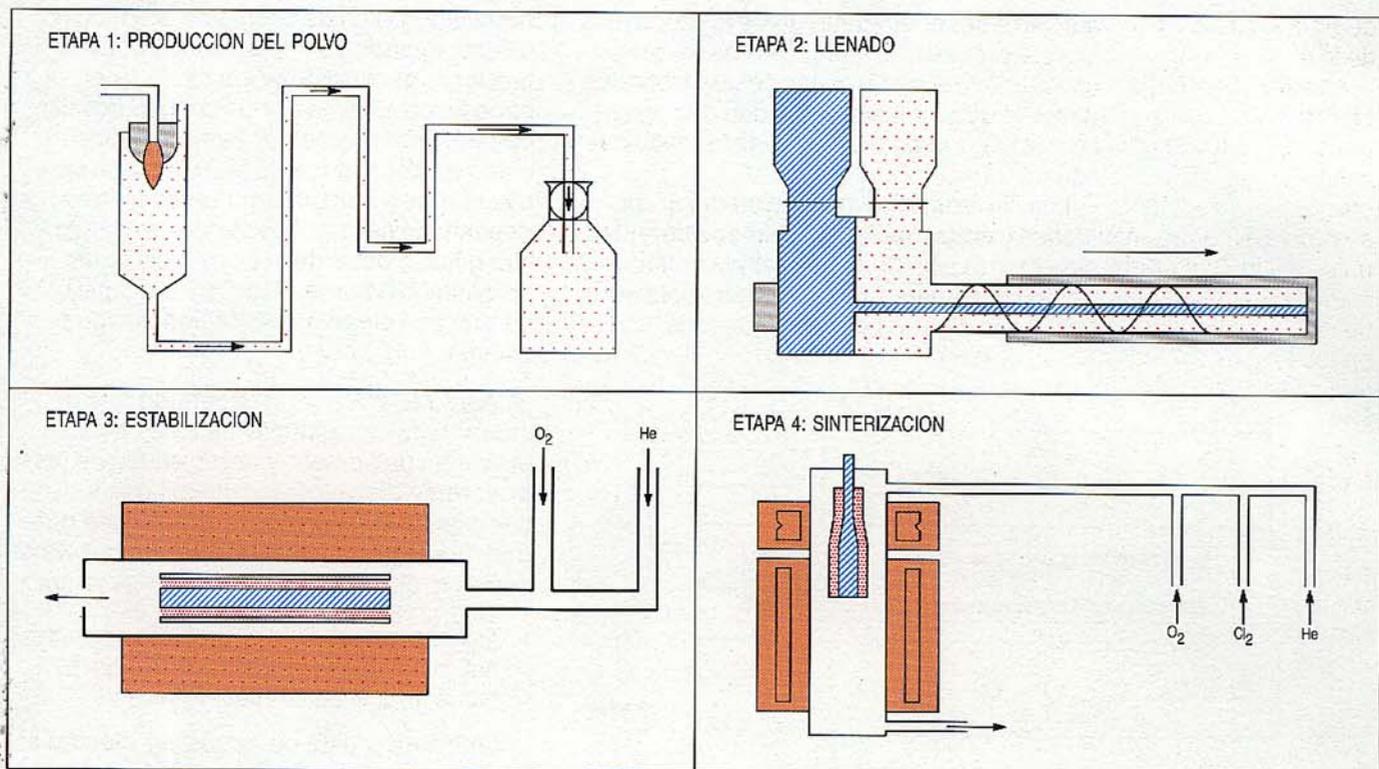


Figura 5
Etapas de producción
en el MSP.

Técnicas no basadas en tubos

Sol-gel: se puede depositar la sílice en estado poroso a partir de diversas soluciones, mediante moldeado o técnicas similares. Los principales problemas encontrados son los largos tiempos de proceso y la formación de fisuras. Hasta la fecha no ha resultado factible utilizar estas técnicas para producir el material del núcleo de fibras de estructura convencional. Sin embargo, los conocimientos actuales hacen pensar que tales métodos puedan en el futuro aplicarse a la producción de sustratos o tubos para recubrimientos muy puros.

Moldeado mecánico de preformas (MSP): desde 1983 el Centro de Investigación de Alcatel SEL desarrolla un nuevo método para la producción de preformas, llamado MSP. La necesidad de producir partículas de óxido y depositarlas desde un mismo torrente de gas en un solo reactor, implica que los procesos CVD suelen alcanzar velocidades de producción bajas (menos de 10 g/min) y un rendimiento de material inferior al 60%, además de requerir una maquinaria costosa.

En la técnica MSP, la producción del óxido se separa del moldeado de la preforma (Fig. 5). La velocidad de producción del polvo de sílice de calidad química excede de 10 kg/min, con un rendimiento próximo al 100%. Puede obtenerse en laboratorio material ultrapuro para el MSP, con un contenido de impurezas reducido desde varias partes por millón hasta por

debajo del umbral de detección del análisis químico, es decir, menos de una milésima de parte por millón para cada impureza metálica. Se ha demostrado que esa pureza se mantiene cuando se entregan los polvos al fabricante de preformas y durante el proceso ulterior, utilizando un sistema de carga y cierre (dos válvulas de escape y una cámara que puede descargarse) para la maquinaria de proceso y los contenedores de transporte.

Para rellenar a velocidad regulable y simultáneamente los polvos del núcleo y de la envoltura en tubos de cuarzo reutilizables, se sigue un proceso de extrusión. Aunque la densidad de apilamiento del material sea originalmente muy baja (20 g/l), se ha logrado ya limitar las fluctuaciones a $\pm 2\%$. Dependiendo del diámetro de la preforma y de las propiedades de los polvos, el estado actual de la técnica permite una velocidad de llenado de 30 g/min. El tamaño de las preformas porosas (actualmente 1000 mm de longitud y 80 mm de diámetro) puede aumentarse fácilmente, ya que el proceso sólo está limitado por la maquinaria disponible.

Tras un tratamiento térmico a 1000 °C, el polvo compactado puede extraerse del tubo de cuarzo convertido en preforma porosa. En función de la densidad de llenado, de esta preforma pueden obtenerse de 20 a 50 km de fibra. Añadiendo una segunda etapa de llenado o mediante un proceso de "barra entubada", probablemente se conseguirían más de 100 km sin

degradación alguna de las características de la fibra.

Además de suprimir los iones OH, las impurezas residuales de los metales de transición reaccionan para dar cloruros volátiles y son expulsadas de la preforma durante la cloración. Después de la misma, se producen preformas transparentes por un proceso de sinterización.

Para caracterizar las etapas del proceso de producción, se han preparado fibras ópticas multimodo de salto de índice. La mínima atenuación lograda por este tipo de fibra fue de 1 dB/km, con bastante independencia de la longitud de onda. Se han llegado a producir fibras ópticas monomodo con pérdidas de 0,55 dB/km solamente, que se espera reducir aún más a corto plazo introduciendo nuevos procesos probados ya satisfactoriamente. No se ha observado ninguna absorción vinculada con impurezas.

Los altos rendimientos del material, grandes tamaños de preformas, la sencillez de la maquinaria y la brevedad de los procesos probablemente darán lugar a procesos de bajo coste para producción de la siguiente generación de preformas.

Conclusiones

Con la tecnología actual de producción de fibras ópticas no se satisfacen los futuros

requisitos en cuanto a cantidad y costes de producción. En consecuencia, en todo el mundo se investigan nuevos procesos y se perfeccionan los actuales. El esfuerzo de investigación y desarrollo de Alcatel en este campo se dirige a corto plazo a reducir los costes de producción de los procesos utilizados por sus propias Compañías, y a largo plazo a elaborar conceptos totalmente nuevos para su posible implantación futura. Los resultados conseguidos hasta la fecha son prometedores, y no son de temer grandes obstáculos, aunque todavía queden por superar ciertos obstáculos tecnológicos.

Reimund Dorn nació en 1946 en Gelsenkirchen, Alemania. Estudió ciencias físicas en la RWTH de Aquisgrán, donde se graduó Dipl Phys en 1973 y doctoró en 1976. Al año siguiente ingresó en el Centro de Investigación de Alcatel SEL para trabajar en el área de transductores optoelectrónicos basados en InP. En la actualidad el Dr. Dorn es el responsable de la división de fibras ópticas y tecnologías básicas del Centro de Investigación de Alcatel SEL.

Christian Le Sergent nació en 1941 en Marcoussis, Francia. Estudió química en la Universidad de Orsay recibiendo la licenciatura en ciencias en 1961, año en que ingresó en Laboratoires de Marcoussis, donde sucesivamente se ha dedicado a investigar sobre pilas de combustible, láseres y fibras ópticas. El Sr. Le Sergent es actualmente responsable del grupo de vidrios y preformas de la división de energía y materiales de Laboratoires de Marcoussis.

Investigación en componentes optoelectrónicos

Los componentes optoelectrónicos como láseres y fotodiodos de avalancha han revolucionado ya la transmisión a larga distancia, aunque tal tecnología siga todavía en la infancia. Las futuras generaciones de componentes optoelectrónicos verán crecer la integración de funciones ópticas, optoelectrónicas y electrónicas en la misma pastilla, aportando espectaculares mejoras en prestaciones y las reducciones de costes necesarias para introducir a gran escala servicios y redes de banda ancha.

O. Hildebrand

Centro de Investigación de Alcatel SEL,
Stuttgart, República Federal de Alemania

J. Benoit

E. Duda

Laboratoires de Marcoussis, Marcoussis,
Francia

Introducción

Los componentes optoelectrónicos son los elementos clave para los sistemas de comunicaciones de fibras ópticas. En el extremo transmisor, convierten el tren de datos eléctricos en señales luminosas que ha de guiar la fibra óptica, y a su vez transforman la salida luminosa de la fibra en datos eléctricos en el lado receptor.

El compuesto cuaternario InGaAsP/InP es ideal para longitudes de onda comprendidas entre 1200 y 1600 nm, las más adecuadas para comunicación por fibras ópticas. Ventaja importante de este sistema de materiales es que, en contraste con el Si o el Ge, permite obtener monocristales formados por capas de composiciones diferentes – por lo tanto con distintas propiedades ópticas y eléctricas –, y esto posibilita la optimización de los dispositivos llamados de heteroestructura.

Las actividades de investigación sobre componentes optoelectrónicos dentro de Alcatel NV responden a las necesidades de los futuros sistemas de transmisión, y a corto plazo se concentran en la mejora de los componentes existentes – láseres de realimentación distribuida (DFB), fotodiodos de avalancha (APD), u otros – con miras a la reducción de costes, al aumento del rendimiento de la oblea y a conseguir un óptimo balance de potencia de transmisión en enlaces que operen entre 0,5 y 2 Gbit/s salvando vanos de 50 a 120 km. A medio plazo la investigación apunta a tres objetivos básicos: velocidades superiores a 10 Gbit/s

en sistemas de línea terrestre, transmisión a larga distancia con vanos de repetición mayores de 120 km, y obtención de láseres y detectores de bajo coste para el área de abonado. Con el logro del tercer objetivo cae la última barrera para la introducción masiva de nuevos servicios de banda ancha, esto es, el elevado coste de los componentes optoelectrónicos en las líneas de abonado.

La futura generalización de servicios de banda ancha, proceso de señal a velocidades altas y nuevos conceptos como la transmisión coherente exigirán una creciente integración monolítica de las pastillas del transmisor y del receptor, lo que plantea un fuerte reto a la investigación de componentes optoelectrónicos. Se precisa crear una nueva tecnología de integración capaz de combinar en la misma pastilla tanto el proceso de la señal eléctrica como la manipulación activa y pasiva de las señales ópticas; surgirá así una familia entera de circuitos integrados optoelectrónicos (CIOE) multifuncionales, ajustados a requisitos de sistemas específicos, que reemplazarán a los láseres y detectores de función única actuales.

Dispositivos transmisores

Mientras que en redes de área local de distancias cortas o enlaces entre ordenadores pueden utilizarse LED, los enlaces por fibra monomodo requieren láseres de InGaAsP/InP trabajando en longitudes de

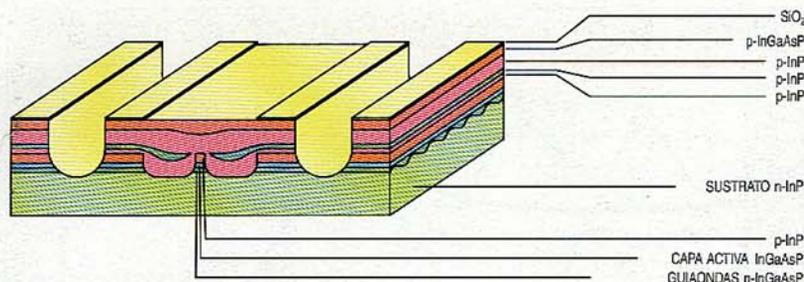


Figura 1
Sección transversal
de una estructura
láser DFB-DC-DCPBH.

onda de 1300 a 1550 nm. En principio, este láser es un guíaondas plano de InGaAsP con sección transversal de 1 a 2 μm por 0,1 a 0,2 μm y algunas centenas de micras de longitud, enterrado en material de InP (de heteroestructura enterrada o BH), cuya banda prohibida es mayor. El InP se dopa de forma que la zona activa de InGaAsP se intercala entre InP de los tipos *n* y *p*. Aplicando a este láser *pn* una polarización directa se inyectan portadores libres (elec-

trones y huecos) en la franja activa, y debido a la diferencia de banda prohibida los portadores quedan confinados y muy concentrados ($\sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$), originando una recombinación estimulada y la generación de luz. Además, la diferencia de índices de refracción entre el InGaAsP y el InP que le rodea confinan la onda óptica en torno a la franja activa. La realimentación óptica que requiere la operación láser se obtiene bien mediante cristales planos pulimentados reflectantes en ambos extremos de la cavidad, constituyendo un láser Fabry-Pérot que suele emitir en tres a diez modos longitudinales, o bien, en el caso de láseres DFB, merced a una red de difracción óptica dentro del cristal, cerca de la franja activa, que crea una realimentación óptica distribuida a lo largo de todo el guíaonda. Tales retículas obligan a los láseres DFB a emitir en un solo modo longitudinal, lo que les hace idóneos para sistemas de transmisión donde la dispersión de la fibra óptica es el factor limitativo del producto velocidad binaria \times distancia.

Estas redes ópticas submicrónicas se fabrican convencionalmente por litografía holográfica, técnica que permite realizar con precisión de 0,001 μm el paso de red mencionado (p.ej., 0,4 μm para una red de segundo orden a 1300 nm).

La tecnología de fabricación de láseres Fabry-Pérot se ha transferido a Alcatel-ATC, que fabrica estos láseres desde hace años con resultados muy fiables. Así, son utilizados en los enlaces Francia-Córcega, y pronto van a serlo en la vía TAT 8. De hecho, ya ha iniciado Alcatel ATC la fabricación de láseres DFB-BH de 1550 nm para los futuros TAT 9 y TASMÁN.

Las investigaciones actuales apuntan a optimizar el diseño de las redes difractoras con miras a mejorar las propiedades de los láseres DFB y el rendimiento de producción, así como a desarrollar nuevos láseres monolíticos DFB que requieran redes localizadas (redes con diferentes pasos sobre la misma oblea). Para lograr estos objetivos se están aplicando nuevas tecnologías, como la litografía de haces electrónicos, la litografía de contacto directo mediante rayos ultravioletas y el ataque en seco por bombardeo iónico.

Láseres DC-DCPBH

Una estructura alternativa al tipo BH es la del láser DCPBH (heteroestructura planar enterrada de doble canal), desarrollada para incrementar el rendimiento de producción y la potencia óptica de salida. La estructura DFB-DC-DCPBH, esquematizada en la figura 1, se consigue en dos etapas de epitaxia por fase líquida: en la primera se hace crecer la capa guía, la capa activa de

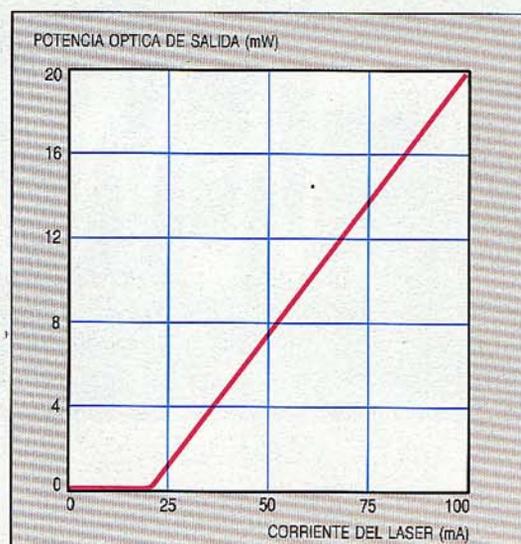
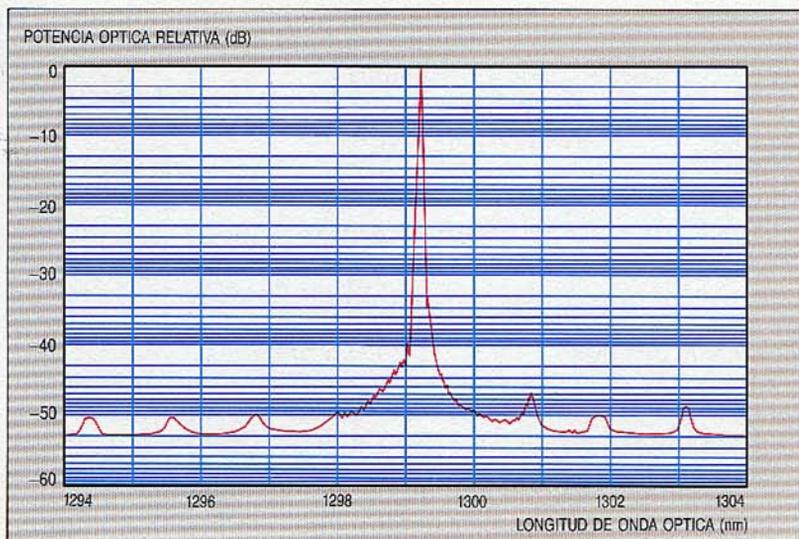


Figura 2
Características típicas
luz-corriente (derecha)
y modos espectrales
(abajo) de un láser
DFB.



InGaAsP y además una capa InP del tipo *p*. A continuación se graban dos canales (de ahí el término doble canal), que definen entre ellos una franja activa de anchura inferior a 2 μm ; en la segunda etapa se hacen crecer nuevas capas (*p* de InP, *n* de InP, *p* de InP, *p* de InGaAs) con una secuencia de dopado tal que se crea una estructura tiristor de gran superficie que bloquea la corriente fuera de la franja activa. Con un control cuidadoso del proceso epitaxial de fase líquida se puede prescindir del crecimiento de la capa *n* de InP situada sobre la franja activa, de manera que se obtiene un diodo láser *pn*.

En la figura 2 se presentan las características electroópticas de onda continua de un láser DFB-DC-DCPBH. Las corrientes típicas de umbral se sitúan entre 10 y 30 mA, con potencia óptica de salida mayor de 20 mW. En esta misma figura también se aprecia la pureza espectral de la raya del láser: los modos de emisión laterales no deseados son atenuados en más de 30 dB.

El principio de bloquear la corriente por uniones *pn* ó *pnpn* presenta un serio inconveniente: la gran capacidad de esas uniones limita las prestaciones en alta velocidad. Una solución consiste en introducir dos canales suplementarios adyacentes a la propia franja activa, atacados hasta alcanzar el sustrato de InP, obteniendo así un láser DC-DCPBH (Fig. 1) en el que se han eliminado de raíz las capacidades parásitas del tiristor. Se han conseguido excelentes características a frecuencias altas, con frecuencia de corte a 3 dB de 11,5 GHz y velocidad de modulación RZ (retorno a cero) de 5 Gbit/s (Fig. 3).

Para que puedan utilizarse en sistemas de transmisión las pastillas deben ir encapsuladas en módulos láser; el tamaño típico de pastilla es de 300 x 300 x 100 μm solamente. El módulo láser incorpora la pastilla láser DFB, un fotodiodo supervisor de InGaAsP/InP en la cara trasera del láser para controlar la potencia óptica de salida, y un elemento enfriador Peltier más un termistor para el control térmico de la pastilla. El parámetro más crítico de los módulos láser es la estabilidad a largo plazo del acoplamiento láser-fibra, que debe mantenerse dentro de un margen próximo a 1 mm a temperaturas entre -20°C y +70°C, para una vida útil de 25 años. Una estabilidad tal exige refinadas técnicas de soldadura para la fijación de la fibra y el ensamblado del módulo.

En aplicaciones de alta velocidad, se debe cuidar, al diseñar el módulo y su ensamblado, de no degradar las características de la pastilla láser en alta frecuencia.

El ruido causado por realimentación óptica externa puede incrementar la tasa de

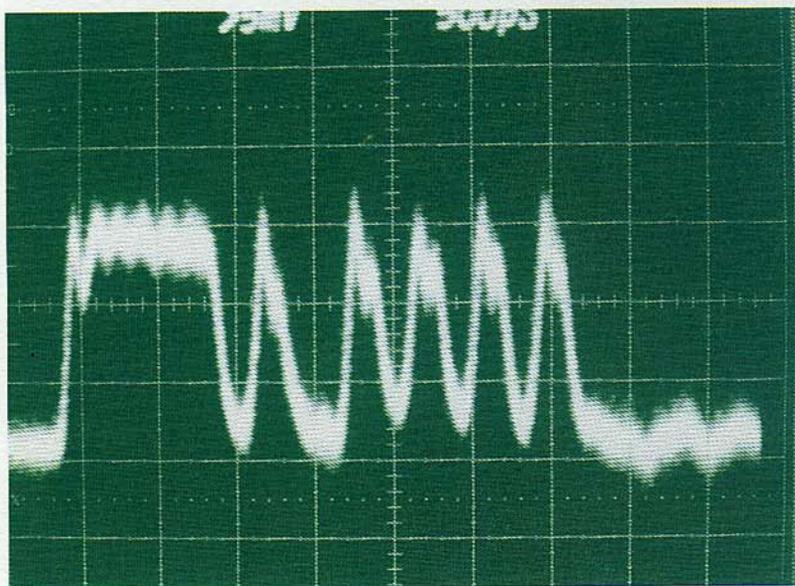
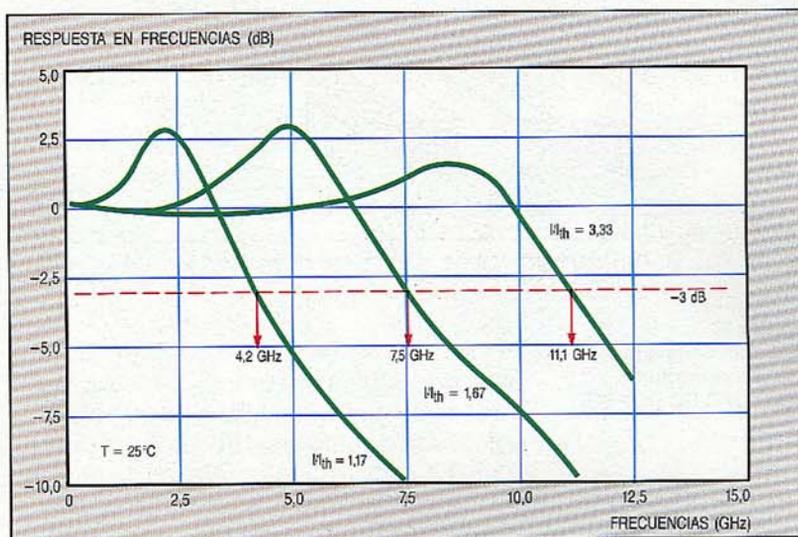


Figura 3 Propiedades dinámicas de un láser DFB-DC-DCPBH.

errores de bit, sobre todo para altas velocidades, y es posible suprimirlo mediante un aislante óptico consistente en un disco giratorio de Faraday rodeado de un imán permanente, que se sitúa entre el láser y la fibra. Están en estudio módulos láser provistos de aislantes integrados, con pérdidas de inserción menores de 1 dB y aislamientos superiores a los 30 dB. Dado que esto requiere más etapas de ensamblado, Alcatel diseña ahora como alternativa estructuras de láser DFB de baja sensibilidad a la realimentación.

Láseres para sistemas de multiplexación en longitud de onda

Se consigue aumentar la capacidad de transmisión por fibra utilizando varios canales ópticos (multiplexación por división de longitudes de onda). En la Feria de Hannover de 1986 se demostró un sistema multiplexor en longitud de onda a 4 x 565 Mbit/s

que trabajaba en el margen de los 1300 nm con 40 nm de separación entre canales, utilizando entonces cuatro láseres Fabry-Perot independientes¹.

La integración de varios láseres emitiendo a longitudes de onda distintas con dispositivos de multiplexación óptica y guíaondas de bajas pérdidas reducirá espectacularmente el coste del encapsulado, a la par de mejorar la fiabilidad y compacidad del transmisor. El factor esencial, sin embargo, es el balance de transmisión de línea, que obliga a investigar dispositivos de multiplexación/demultiplexación y guíaondas de muy bajas pérdidas. Alcatel ha realizado la integración monolítica de dos láseres DFB que emiten a longitudes de onda separadas entre sí 30 nm, en la región de los 1500 nm. Estas longitudes de onda se controlan mediante el paso de las respectivas redes de difracción, fabricadas por exposición holográfica en dos fases y procesos de ataque húmedo. En cada láser, la corriente umbral era de 20 mA, con más de 3 mW de potencia de salida, y la supresión de modos laterales superaba 30 dB con anchura de banda de modulación de 2 GHz, presentando además una débil diafonía eléctrica (~ -20 dB a 600 MHz) debido al alto aislamiento eléctrico resultante de los canales grabados. Se han realizado guíaondas de heteroestructura de muy bajas pérdidas ($0,4$ dB cm^{-1}), que pueden acoplarse a estos láseres eficazmente.

Láseres para modulación directa a velocidades muy altas

Para aumentar la capacidad de transmisión en un sistema de detección directa se puede asimismo incrementar la velocidad de modulación de los láseres utilizando un solo canal óptico. Se han conseguido modulaciones RZ de 5 Gbit/s en láseres convencionales, del tipo DFB-DC-DCPBH por ejemplo, y parece posible alcanzar los 8 a 10 Gbit/s con el dispositivo actual.

Incorporando estructuras de pozos cuánticos en el interior de la franja activa, se espera obtener velocidades binarias mayores de 20 Gbit/s. Estas estructuras se basan en el principio de que alternar capas aisladas o múltiples extremadamente delgadas — algunos nanómetros — de distinta composición (InGaAs/InP, por ejemplo) produce efectos de cuantización de electrones y huecos, y a su vez reduce considerablemente las constantes de tiempo, la fluctuación de longitud de onda y el valor de la corriente umbral, y eleva el rendimiento de la conversión electroóptica. Las estructuras de pozos cuánticos sólo pueden realizarse con refinadas tecnologías epitaxiales, en manos del Grupo de Investigación de Alcatel, tales como la epitaxia de

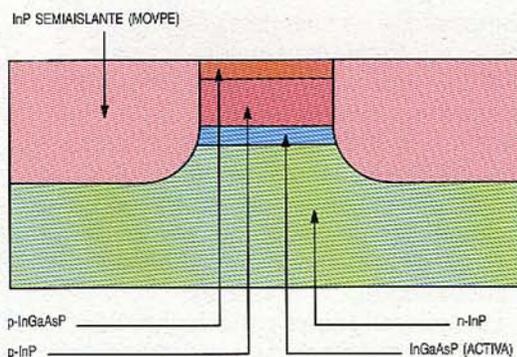


Figura 4
Sección transversal de un láser BH con capas semiaislantes para bloquear la corriente.

haces moleculares (MBE) y la epitaxia de metales orgánicos a baja presión en fase de vapor (LPMOVPE).

No obstante, para desarrollar láseres a muy alta velocidad primero ha de reducirse el producto RC; en los láseres actuales éste proviene de las capacidades parásitas de las capas *pn* que bloquean la corriente a un lado y otro de la capa activa.

Alcatel ha introducido una nueva tecnología que reduce drásticamente las capacidades parásitas; con la epitaxia MOVPE se consiguen capas de semiconductores de propiedades eléctricas semejantes a las de los aislantes. Se han medido así resistividades superiores a 10^9 Ω cm en capas de InP dopadas con Fe.

Esta tecnología se empleó para conseguir la sencilla estructura láser de la figura 4.

Las capas críticas *pn* de bloqueo de corriente se sustituyen aquí por este material de InP semiaislante. Los primeros láseres procesados tenían un ancho de banda de modulación de 7 GHz y solamente 4 pF de capacidad total de la pastilla, sin utilizar ninguna técnica complementaria como el ataque de canales para bloquear parásitos. Compárese este valor con las capacidades típicas de una pastilla láser, de 15 a 20 pF.

La futura sustitución de la capa activa por estructuras de pozo cuántico y la integración con segmentos de modulación permitirá transmitir a muy alta velocidad (p. ej., 20 Gbit/s) por un solo canal óptico.

Transistores bipolares de heteroestructura doble para excitadores de láseres

Se utilizarán transistores monolíticamente integrados en la pastilla láser para la modulación de alta velocidad, dado que un circuito de excitación integrado permite adaptar impedancias al láser o al segmento de modulación, a la par de eliminar las capacidades e inductancias parásitas creadas por los hilos de conexión.

Como indica la figura 5, Alcatel ha utilizado la técnica MOVPE para realizar transistores bipolares de heteroestructura doble (DHBT). Una vez más, se han combinado en un cristal único capas de distinta

composición de materiales InGaAsP/InP, optimizando así las características del DHBT. El resultado es que los DHBT desarrollados por Alcatel presentan la máxima ganancia en corriente, 26000, conocida hasta la fecha en transistores simples. Se caracterizan por ser simétricos (el colector puede funcionar como emisor y viceversa), lo que les hace sumamente adecuados para la integración monolítica.

El siguiente paso será la integración monolítica de tres de estos DHBT con el láser de la figura 4 para obtener un circuito integrado optoelectrónico excitador del láser. En las etapas posteriores se integrará con el láser el circuito de control eléctrico completo.

Láseres de bajo coste

Una pastilla láser de bajo coste debe ofrecer buenas prestaciones, sobre todo en cuanto a los parámetros del láser que dependen de la temperatura. Así, un módulo láser poco costoso habrá de prescindir del enfriador Peltier, con lo que la temperatura de operación de la pastilla podrá variar entre -20°C y $+70^{\circ}\text{C}$, mientras que los láseres actualmente utilizados en enlaces de transmisión están estabilizados a 25°C .

Con el fin de reducir los costes de proceso y obtener más pastillas por cada oblea,

el láser deberá ser realizado por procesos epitaxiales sobre extensas zonas de la oblea, tales como el MBE o el MOVPE. La estructura láser semiaislante antes descrita satisface todos estos requisitos.

Para reducir aún más los costes, ya se trabaja en la integración monolítica del láser con su diodo de supervisión; así se podrá operar y probar los láseres en la oblea, sin tener que cortar ésta ni montar y probar las pastillas una a una. Se pueden procesar conjuntamente unos 20000 láseres en una oblea de 2 pulgadas de diámetro, un enorme avance hacia la introducción de láseres de bajo coste en líneas de abonado.

Láseres para transmisión coherente

Desde la perspectiva de sistema, la detección coherente, por desgracia de banda estrecha y limitada básicamente por el ruido de granalla, mejora la sensibilidad del receptor en 5 a 10 dB y aumenta de modo espectacular el número de canales multiplexados en un intervalo espectral dado (por ejemplo, 100 canales a 600 Mbit/s en 10 nm). Estas ventajas potenciales se podrían aprovechar en un próximo futuro en sistemas de transmisión de largo alcance, así como en fuentes de redes multicanales coherentes (transmisor y oscilador local).

El requisito más crítico de estas fuentes es un ruido de fase débil, es decir, la mínima anchura espectral posible. A velocidades de transmisión medias (600 Mbit/s), ambos formatos MDF (modulación por desplazamiento de frecuencia) y MDPD (modulación por desplazamiento de fase diferencial) requieren anchuras espectrales inferiores a 1 MHz. En el desarrollo de redes multicanales coherentes multiplexadas en frecuencia, se exige además el requisito de capacidad de sintonización continua entre 5 y 10 nm.

Alcatel ha acometido investigaciones en láseres para detección coherente. Este programa de investigación cubre una amplia gama de actividades, desde la optimización de estructuras láser DFB estándar para reducir su anchura espectral hasta el diseño y la realización de láseres monomodo multi-sección integrados. En estas últimas estructuras, una etapa de ganancia excitada por una corriente de pocas decenas de mA se acopla ópticamente a otra etapa diseñada para modular la fase o para sintonizar la longitud de onda de operación del modo láser mediante bajas corrientes de excitación, con lo que la coherencia del haz emitido se preserva durante la modulación o la sintonía.

En la figura 6 se muestra un ejemplo de láser monomodo multi-sección, que presenta un transmisor MDF compuesto de una sección láser DFB y otra sección de modulación de fase. Este dispositivo per-

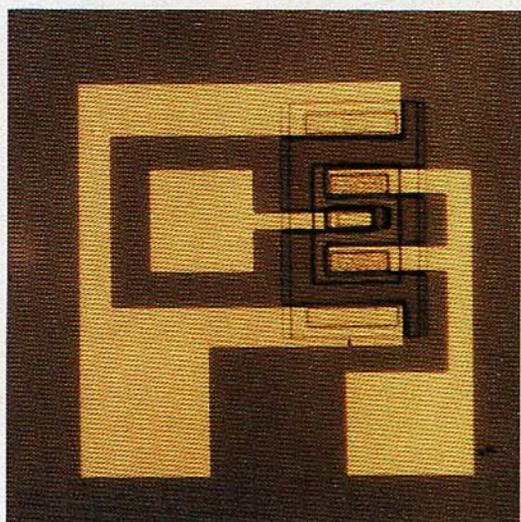
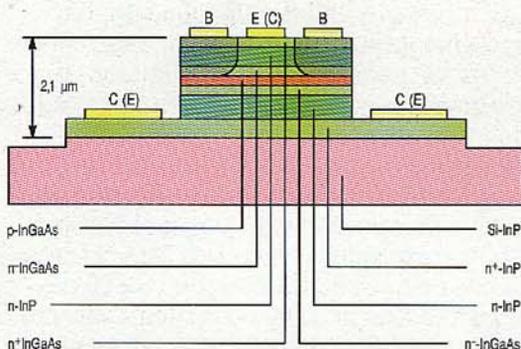


Figura 5
Vista superior y corte transversal de una estructura DHBT.

mite modular en FM sin distorsión parásita en AM, hasta los 500 MHz, con un elevado rendimiento de modulación (1 GHz/mA).

Para poder sintonizar de modo continuo la longitud de onda de operación en un amplio espectro se requieren dispositivos más complejos, de tres secciones. Los análisis teóricos demuestran la viabilidad de sintonía continua sobre más de 5 nm; los primeros resultados obtenidos por Alcatel confirman ya la sintonía continua sobre 3,2 nm.

Amplificadores ópticos de onda progresiva

Los amplificadores ópticos de onda progresiva utilizan la ganancia obtenida en un solo paso de la onda, asociada a la emisión estimulada de un láser de semiconductores con espejos de baja reflectividad, para inhibir así la oscilación del láser. Estos amplificadores tienen una anchura de banda óptica particularmente grande, típicamente de 50 nm (8000 GHz a 1500 nm), y están llamados a jugar un papel importante como amplificadores de línea en los sistemas de transmisión de largo alcance por detección

directa, y como amplificadores de banda ancha para gran número de canales (por ejemplo, 1000) en redes multicanales coherentes.

Alcatel colabora actualmente con el CNET en el estudio de amplificadores ópticos de onda progresiva, en el seno de un programa de la CEE. Recientemente se han obtenido ganancias muy altas (30 dB) a 1520 nm utilizando un láser BH de 800 μm de longitud, a partir de una heteroestructura de epitaxia de haces moleculares de fuente gaseosa, GSMBE. La reflectividad especialmente baja de las caras talladas ($R \sim 10^{-4}$) se consiguió por deposición de películas de SiO_x con disparo electrónico. En estos dispositivos ya se están logrando mejoras en cuanto a insensibilidad a la polarización, potencia de saturación en salida, ruido y fiabilidad.

Dispositivos receptores

En los sistemas actuales de 1300/1500 nm la conversión de los impulsos luminosos a impulsos eléctricos en el extremo receptor de la fibra se realiza habitualmente por fotodetectores de InGaAsP/InP.

Fotodetectores PIN

El componente optoelectrónico de InGaAsP/InP más sencillo de imaginar es el fotodetector PIN, que consiste en una capa de 2 μm de espesor de InGaAs crecida sobre un sustrato de InP. La capa de InGaAs absorbe la luz y la convierte en corriente eléctrica merced a la unión *pn* incorporada.

La fabricación de estos dispositivos comenzó hace años. Se produjeron detectores PIN planares para aplicaciones de sistemas submarinos esencialmente, y los detectores PIN del tipo mesa de altas prestaciones se utilizaron en módulos receptores PIN-FET concebidos para líneas interurbanas (ejemplo, la red alemana BIGFERN).

Como fruto obtenido de la investigación optoelectrónica puede citarse una cabeza de prueba óptica ultrarrápida basada en el detector PIN del tipo mesa: las señales ópticas de 1000 a 1600 nm se convierten a señales eléctricas con una respuesta en frecuencias plana bien superior a 9 GHz. Entre sus aplicaciones se incluyen la detección y medición de las señales ópticas de alta frecuencia.

La investigación en detectores PIN monofunción apunta a lograr una reducción de coste aún mayor utilizando, por ejemplo el MOVPE en grandes superficies.

Fotodiodos de avalancha

Actualmente se están transfiriendo a Alcatel para su fabricación fotodetectores APD con

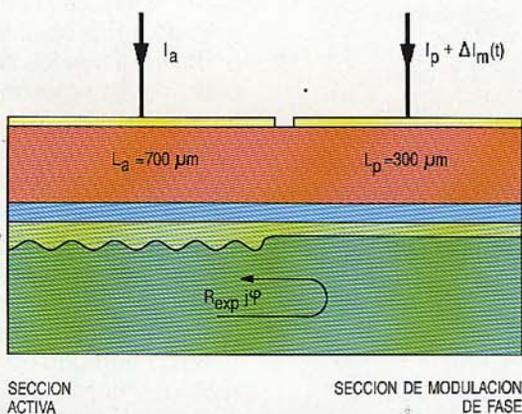
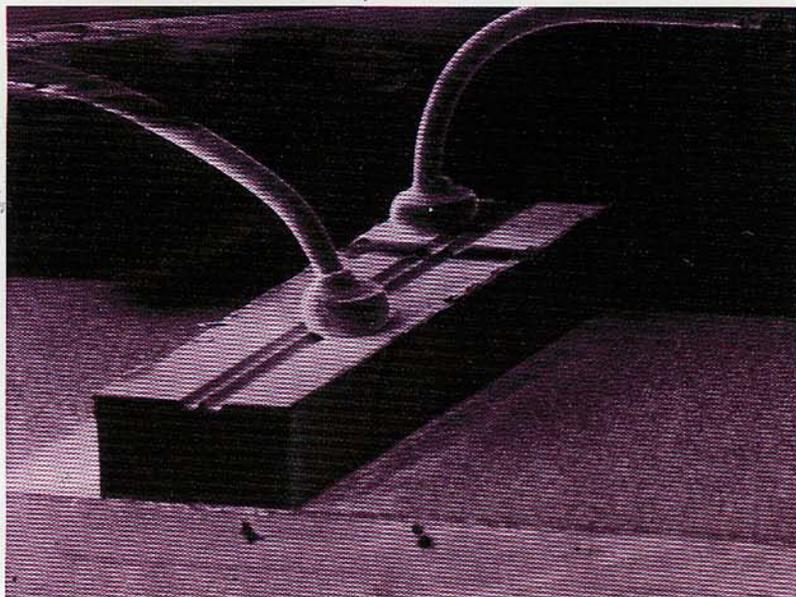


Figura 6
Imagen al microscopio electrónico y corte transversal de un láser monomodo multisección.



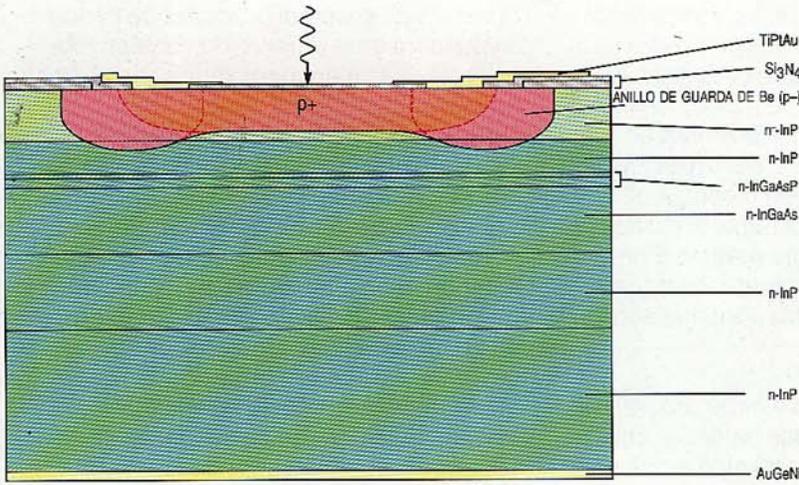
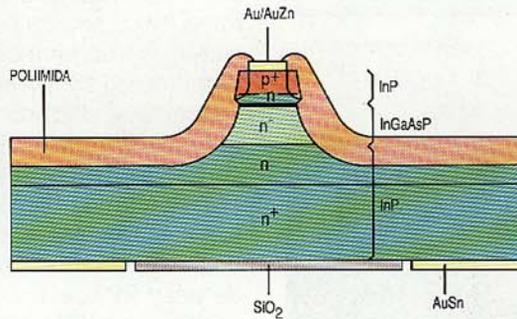


Figura 7
Sección transversal de un APD planar.

regiones independientes de absorción, multiplicación y heterointerfaz gradual. Básicamente contienen también una capa de absorción luminosa de InGaAs(P), pero los portadores libres generados son atraídos desde esa capa hacia una unión *pn* de InP contigua, merced a un campo eléctrico con potencia suficiente para producir multiplicación de los portadores mediante ionización por impacto. El rendimiento de la conversión de luz a fotocorriente supera así el 100%.

El principal problema en la producción de APD radica en el fuerte campo eléctrico que existe en el límite de la región InP. El campo cercano a 10^6 V/cm que necesita la multiplicación por avalancha podría producir ruptura en el borde del dispositivo de no reducir suficientemente el campo interno antes de

Figura 8
Sección transversal de una estructura mesa APD tipo "tapón de champán".



alcanzar la superficie. Este problema se soluciona con el APD planar, representado en la figura 7, cuya estructura queda formada por las capas absorbentes (y de interfaz gradual) de InGaAs(P), seguidas por un diodo *np+* de InP. La luz incide en el cristal desde arriba. En este caso, el campo queda reducido por el "anillo de guarda" implantado, cuyo perfil de dopado difiere de la zona activa, dando lugar a una tensión de ruptura de avalancha superior. La pasivación de la

unión de superficie se consigue por PECVD (deposición de vapores químicos intensificados en plasma) de películas dieléctricas de SiN_x .

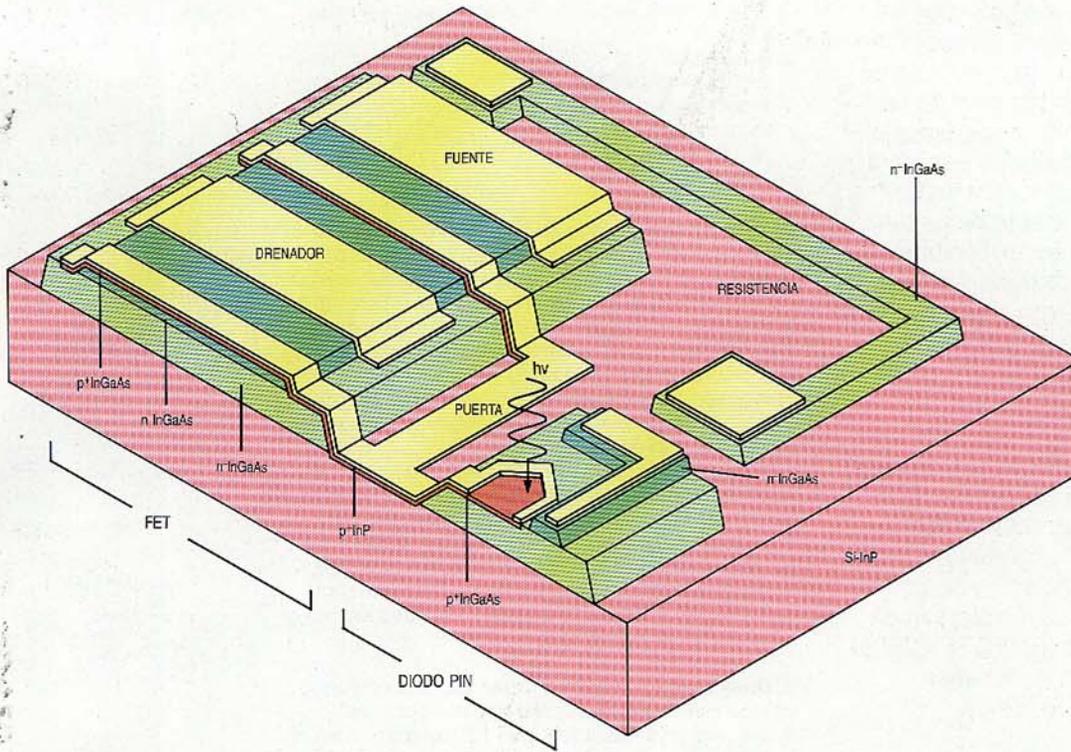
Las pruebas de envejecimiento realizadas sobre APD planares operando en condiciones de ruptura, han permitido demostrar su fiabilidad incluso a temperaturas de 200°C . Se han obtenido multiplicaciones de fotocorriente de hasta 60, con débiles corrientes de oscuridad entre los 10 y los 100 nA, a tensiones del 90% de la de ruptura. Los APD planares se han concebido para aplicaciones de alta fiabilidad y velocidades que pueden alcanzar los 3 Gbit/s, como en las vías de transmisión submarinas o rutas terrestres.

El hecho de que los APD planares necesiten anillo de guarda implica añadir capacidad en paralelo y flujo de corriente de oscuridad a través del anillo. La figura 8 muestra otra estructura de APD desarrollada por Alcatel para transmisión a velocidades muy elevadas. La filosofía de diseño de este APD mesa en "tapón de champán" consistía en minimizar el exceso de capacidad y la corriente de oscuridad, garantizando así el buen funcionamiento a velocidades altas de transmisión. La luz incide a través del sustrato de InP (transparente a esa longitud de onda) para que los contactos no den sombras, inevitables con iluminación desde arriba. Se utiliza sustrato *n* de InP para lograr un alto rendimiento cuántico, y la capacidad mínima se obtiene por simple ataque de la mesa. No obstante, este perfil mesa no permite reducir el alto campo eléctrico de la superficie, por lo que se utiliza un perfil especial, como muestra la figura 8. Siguiendo un proceso de ataque químico húmedo en tres etapas, el perfil mesa en "tapón de champán" reduce eficazmente el campo eléctrico superficial, evitando así la ruptura en el borde.

El dispositivo se pasiva mediante capas de poliimida o capas dieléctricas PECVD. Con este APD se han conseguido capacidades muy bajas (0,2 pF), y corrientes de oscuridad débiles (~ 20 nA) a $0,9 V_B$ (V_B = tensión de ruptura), así como rendimientos cuánticos elevados. El producto ganancia \times ancho de banda superior a 70 GHz demuestra la posibilidad de utilizar estos dispositivos a velocidades muy elevadas, aun con su gran diámetro actual de $75 \mu\text{m}$.

Se ha realizado un módulo receptor APD que incluye un preamplificador híbrido de transimpedancia de película delgada, para transmisión interurbana a 2,24 Gbit/s con vanos de repetición de 40 km. Unido al módulo láser DFB-DC-DCPBH de 2,24 Gbit/s, este módulo receptor APD ha demostrado en laboratorio² la transmisión

Figura 9
Corte esquemático de
un receptor integrado
PIN FET.



de datos a 2,24 Gbit/s sobre un vano de fibra de 53 km con un margen de sistema mayor de 6 dB.

Circuitos integrados optoelectrónicos de recepción

En la parte electrónica del receptor de CIOE, Alcatel utiliza dispositivos JFET de InGaAs. La meta inicial es conseguir un receptor para detección directa a base de un circuito PIN FET integrado monolítico. La figura 9 muestra un PIN FET integrado, compuesto de un detector planar PIN de InGaAs con un primer preamplificador JFET de doble puerta en InGaAs. Se han realizado varios JFET y resistencias en la misma pastilla, disponiendo así de todos los componentes básicos para la etapa siguiente, que consiste en realizar un receptor PIN FET completo en una sola pastilla. Los datos actuales sobre prestaciones revelan que el diodo PIN tiene un rendimiento cuántico del 50%, una corriente de oscuridad de 1 nA y una capacidad de 0,35 pF, mientras que el FET posee una transconductancia de 150 mS/mm y una corriente de fugas de puerta de 100 nA. La combinación integrada PIN FET es adecuada para una frecuencia de transición de 4 GHz.

La ulterior reducción de la longitud de la puerta y la optimización de las etapas de proceso, así como del trazado del dispositivo y del circuito, conducirán a circuitos integrados optoelectrónicos PINFET de altas prestaciones para aplicaciones de alta velocidad de transmisión, con sensibilidad

similar los circuitos receptores híbridos de APD.

Fruto de este desarrollo serán los receptores de bajo coste para redes de abonados. La relajación de las tolerancias aumentará el rendimiento de fabricación de estos receptores en pastilla única hasta que lleguen a reemplazar a la primera generación de receptores híbridos de bajo coste.

Progresivamente será factible integrar guiondas, demultiplexores en longitud de onda y receptores de FET múltiples, llegando finalmente a un receptor con multiplexación por división de longitud de onda en una sola pastilla de CIOE. En el próximo futuro se realizará un sintonizador óptico CIOE para transmisión coherente que incluirá un láser sintonizable utilizado como oscilador local y un circuito de control DHBT.

Conclusiones

La investigación de láseres y detectores en las últimas décadas ha permitido aumentar continuamente las prestaciones de estos componentes clave. De ahí se ha derivado una rápida mejora de prestaciones y capacidad de transmisión de los sistemas de fibra óptica.

Sin embargo, la evolución de los componentes optoelectrónicos no ha hecho sino comenzar. Todavía han de obtenerse mejoras considerables en prestaciones y coste de los transductores optoelectrónicos monofunción, progresos que gobernarán la

rapidez y penetración de los servicios de banda ancha. Se acentuará la evolución en el grado de integración posible, no sólo de las funciones ópticas sino también de las electrónicas en una pastilla única. Un alto grado de flexibilidad tecnológica permitirá combinar los distintos elementos en los circuitos integrados optoelectrónicos del mañana, especializados en aplicaciones de bajo coste, velocidades de transmisión muy elevadas y sistemas de largo alcance.

Agradecimiento

Los autores agradecen a todos sus colegas de Laboratoires de Marcoussis y Stuttgart que han participado en las actividades descritas en este artículo. Agradecen también su aportación y financiación de actividades específicas al Ministerio alemán de Investigación y Tecnología (BMFT, TK 02886) y a la Comunidad Europea (programas RACE 1027 y 1031, y ESPRIT 263).

Referencias

- 1 K. Fussgänger, W. Köster, H.D. Saller y T. Vollmer: 4 × 560 Mbit/s WDM System Using 3 Wavelength-Selective Fused Single Mode Fibre Couplers as Multiplexer: *12th European Conference on Optical Commu-*

nication, 1986, Barcelona, Technical Digest. volumen 1, pág. 447.

- 2 R. Heidemann: 16 × 140 Mbit/s Time Division Multiplexed Transmission Over 53 km Single-Mode Fibre: *Proceedings of the European Fiber Optic Communication and Local Area Networks Conference*, 1987, pág. 59, Basilea, Suiza.

Olaf Hildebrand nació en Hamburgo, Alemania, en 1948. Se graduó Dipl-Ing en 1973 y PhD en 1977, ambos por la Universidad de Stuttgart. Su tesis se centró en la investigación básica de láseres de semiconductores. Desde 1978, ha investigado principalmente la física y la tecnología de los fotodetectores de avalancha basados en compuestos III-V. Entró en el Centro de Investigación de Alcatel SEL en Stuttgart en 1983, siendo responsable de la división de componentes optoelectrónicos para sistemas de comunicaciones ópticas desde 1985.

Jacques Benoit nació en Boulogne, Francia, en 1938. Se doctoró en electrónica por la Universidad de París-Sur, Orsay, en 1966, y obtuvo el Doctorat d'Etat en física del estado sólido en 1972 por la Universidad de París VI. El Dr. Benoit entró en Laboratoires de Marcoussis en 1964, dirigiendo el grupo de investigación de componentes electrónicos desde 1972.

E. Duda nació en Francia, en 1942. En 1965 se graduó en ingeniería por el Institut National des Sciences Appliquées (INSA) de Lyon, y en 1971 se doctoró por la Universidad de París. Ese mismo año, ingresó en el Centro de investigación de Thomson-CSF para trabajar en investigación y desarrollo de láseres de semiconductores. En 1973, el Dr. Duda pasó a Laboratoires de Marcoussis, donde actualmente dirige el grupo de predesarrollo en el seno de la División de Componentes Optoelectrónicos.

Producción de componentes optoelectrónicos

Se acentúa la importancia de los componentes optoelectrónicos en los sistemas de transmisión modernos, cuyas prestaciones mejoran constantemente. Sin embargo, estos componentes son complejos, y su fabricación debe seguir normas muy exigentes para asegurar alto rendimiento y fiabilidad.

C. Amouroux
J.-P. Pestie

Alcatel Transmissions sur Câbles,
La Ville-du-Bois, Francia

I. R. Isert

Alcatel SEL, Stuttgart, República Federal de Alemania

Introducción

A medida que se generalizan los sistemas optoelectrónicos disminuye su coste, pero ello hace aumentar el coste relativo de los componentes dentro del sistema entero. Sin embargo, para que estos sistemas lleguen a utilizarse tanto como se ha predicho en redes de larga distancia y locales, será forzoso abaratar los componentes optoelectrónicos. Esto sólo se conseguirá desarrollando e introduciendo nuevas tecnologías de fabricación que eleven notablemente el rendimiento de producción, sin dejar de asegurar prestaciones altas y excelente fiabilidad a largo plazo.

Alcatel, uno de los mayores fabricantes tanto de sistemas de transmisión modernos

como de sus componentes (Tabla 1), dedica considerables recursos a elaborar nuevas técnicas de fabricación y ensamble orientadas a ese objetivo.

Fabricación de componentes optoelectrónicos

Se pueden distinguir tres etapas principales en la fabricación de componentes optoelectrónicos: proceso y fabricación, montaje y encapsulado.

En la primera, se obtiene un gran número de dispositivos de una única oblea utilizando sucesivamente tecnologías físico-químicas, tales como el crecimiento epitaxial, la deposición, el ataque químico y la

Tabla 1 – Emisores y receptores

Referencia del producto	Estructura de la pastilla	Tipo de fibra	Encapsulado	Fabricante
Emisores				
TL 2005-215	Láser BH 1,3 μm	multi/mono	específico	CSO
TL 2005-6165	Láser BH 1,3 μm	monomodo	DIL 14 terms.	CSO
TL 2005-4165	Láser BH 1,3 μm	monomodo	"mariposa"	CSO
TL 2155-4165	Láser BH 1,55 μm	monomodo	"mariposa"	CSO
TL 2255-4165	Láser DFB 1,55 μm	monomodo	"mariposa"	CSO
DE 1041-3951	LED 1,3 μm	multimodo	TO39	CSO
T76 – T74	LED em.lat. 1,3 μm	multi/mono	Stud y DIL	ACS
T75 – T73	LED em.lat. 0,85 μm	multi/mono	Stud y DIL	ACS
Receptores				
Módulo 34GF	PINFET	multimodo	DIL 16 terms.	SEL
Módulo 140GF	PINFET	multimodo	DIL 16 terms.	SEL
CG 6070-0151	PIN InGaAs	multimodo	KD 01	CSO
CG 4100-7251	APD Germanio	multimodo	TO72	CSO
CG 5605-7251	PIN Silicio	multimodo	TO72	CSO
CG 5705-7251	APD Silicio	multimodo	TO72	CSO

metalización. Esta etapa suele incluir la comprobación de la oblea, realmente la primera prueba eléctrica efectuada en cada dispositivo, que permite rechazar lo antes posible dispositivos imperfectos y así ahorra costes de proceso innecesarios.

El montaje incluye el corte de la oblea (o el tallado para los dispositivos láser), la fijación del dado al disipador de calor y la soldadura de los hilos de conexionado.

El ensamble supone alinear la cara tallada del láser con la microlente de la fibra, y fijar luego ésta al encapsulado para obtener un módulo emisor o receptor terminado en un tallo de fibra.

Módulos láser BH

Tratamiento de la oblea del láser

El láser de heteroestructura enterrada (BH, *buried heterostructure*), representado en la figura 1, es una cavidad Fabry-Pérot de guiado por índice que goza de características interesantes, tales como:

- baja corriente de umbral
- alto rendimiento cuántico
- confinamiento del haz luminoso emitido
- elevada temperatura máxima de operación.

La última característica permite a los dispositivos funcionar en un amplio margen de temperaturas, y hacer unas eficaces pruebas selectivas a temperaturas altas.

La producción comienza con el crecimiento de una doble heteroestructura de InGaAsP/InP, por un proceso epitaxial de fase líquida (LPE). Se crea luego una estructura mesa, tras lo cual se hace crecer una segunda capa epitaxial para cubrir la parte lateral de la mesa, generando simultáneamente las uniones de bloqueo y la guía óptica. La tabla 2 enumera las etapas principales así como el equipo necesario.

En el tratamiento de la oblea, los procesos LPE son con mucho los más difíciles de controlar, ya que en ellos intervienen compuestos líquidos obtenidos sobre sustrato cristalino, crecimiento regulado básicamente por descenso de la temperatura. Para generar varias capas de composiciones diferentes, se utiliza un molde de grafito (Fig. 2), que contiene tantas celdas como capas existen, cada celda llena de un compuesto fundido y separada de las demás por paredes que se mueven verticalmente. El sustrato, depositado en un contenedor móvil de grafito, puede situarse debajo de cada celda para entrar en contacto con el compuesto líquido. Al pasar el sustrato de una celda a otra, las paredes móviles deben

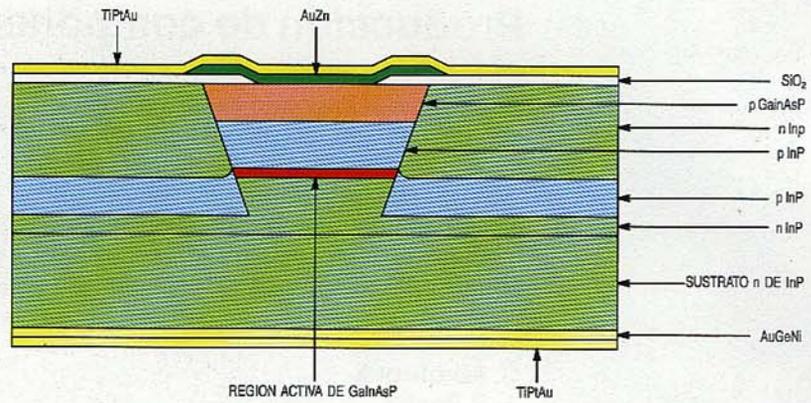


Figura 1
Disposición de un láser de heteroestructura enterrada, con baja corriente de umbral y rendimiento cuántico elevado.

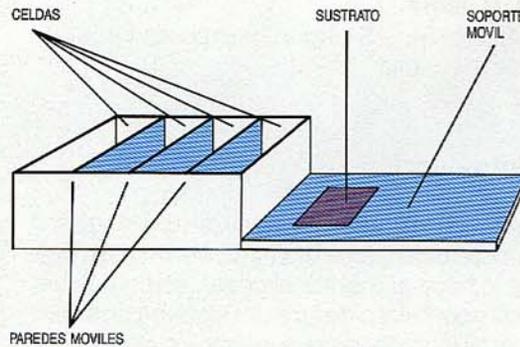


Figura 2
Molde de grafito empleado en la técnica de epitaxia de fase líquida.

mantener una hermeticidad absoluta para impedir una mezcla de compuestos no deseable. A una temperatura dada, el espesor de la capa depende del tiempo que permanecen en contacto el sustrato y el compuesto líquido.

Tabla 2 - Etapas principales del tratamiento de obleas de láseres

Etapa	Etapas del proceso de la oblea	Equipo utilizado
1	Primera secuencia epitaxial: crecimiento de cuatro capas	Epitaxia de fase líquida por horno y molde de grafito
2	Grabado químico de la franja mesa	De máscara y fotolitográfico
3	Segunda secuencia epitaxial: recrecimiento de dos capas para las uniones de bloqueo	Epitaxia de fase líquida por horno y molde de grafito
4	Deposición del óxido de silicio por pasivación superficial	Químico de plasma intensificado por deposición de vapor
5	Grabado químico de las ventanas del contacto	El mismo que para etapa 2
6	Deposición de metalización por aleación de contacto en el lado de la franja (Au-Zn)	Evaporación de metales mediante efecto Joule
7	Aleación	Horno de aleación
8	Deposición de metalización de las capas de Ti-Pt-Au en el lado de la franja	Bombardeo de radio-frecuencia
9	Deposición de metalización por aleación de contacto en el lado n (Au-Ge-Ni)	El mismo que para etapa 6
10	Aleación	El mismo que para etapa 7
11	Deposición de metalización de las capas de Ti-Pt-Au en el lado n (sustrato)	El mismo que para etapa 8

La posición exacta de la franja activa en la base de la mesa, así como su espesor y anchura (típicamente de $2 \mu\text{m}$), determinan las características fundamentales del láser. Esto demuestra claramente la necesidad de controlar con suma precisión el crecimiento LPE. Alcatel ha introducido mejoras en esta tecnología, entre las que cabe destacar:

- diseño especial del molde, al objeto de asegurar la hermeticidad entre celdas
- automatización total de las etapas del proceso
- homogeneización preliminar en hornos especialmente diseñados al efecto.

Gracias a estas mejoras, las obleas procesadas miden alrededor de $150 \times 150 \text{ mm}$, y contienen 1000 dispositivos potenciales. Las obleas "buenas", de las que sale algo más de una por cada tres, pueden proporcionar hasta 500 láseres que cumplan todas las especificaciones requeridas.

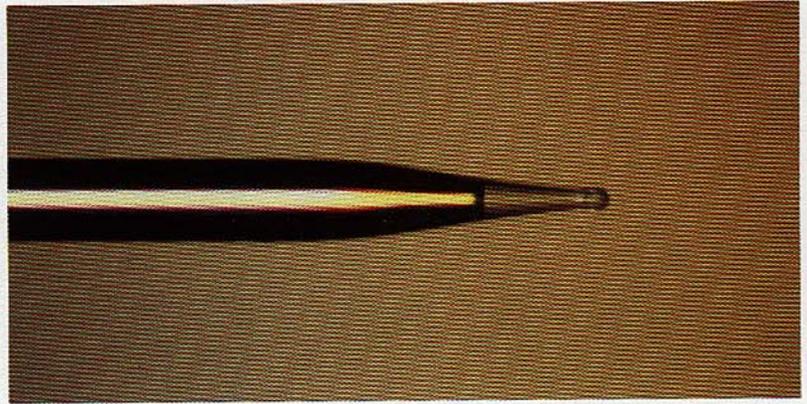
En la segunda secuencia LPE, se hacen crecer dos capas binarias dopadas p y n para definir la guía óptica, es decir, la franja cuaternaria activa cuyo índice de refracción supera al de los materiales contiguos.

Los láseres BH tienen una corriente umbral típica de 30 mA. A una corriente de excitación de 40 mA, la potencia óptica entregada es de unos 5 mW. A 60°C , la potencia óptica máxima alcanza los 20 mW.

Montura de la pastilla y ensamble del módulo

En la figura 3 se representa un módulo láser, que incluye generalmente:

- pastilla del diodo láser, montada sobre una pequeña plataforma de cobre u óxido de berilio



Fibra óptica estrechada con terminación semiesférica, constituyendo un acoplador por microlente de alto rendimiento.

- tallo de fibra terminado en microlente
- fotodiodo de supervisión, de gran superficie activa
- soporte portafibra, con dos resistencias de película delgada
- enfriador por efecto Peltier
- termistor.

Todos estos componentes se ensamblan, ajustan e interconectan en un encapsulado que incorpora los terminales de acceso eléctrico. La caperuza se suelda a la fibra metalizada en el tubo de salida para sellar herméticamente el encapsulado.

El envejecimiento de los materiales de la pastilla láser causa una reducción progresiva de la potencia luminosa emitida, efecto que se contrarresta aumentando la corriente de excitación del láser. Un fotodiodo de supervisión, alineado frente a la cara trasera del láser, permite mantener a nivel constante dicha potencia óptica.

Dada la sensibilidad intrínseca de los materiales de InP, las características del

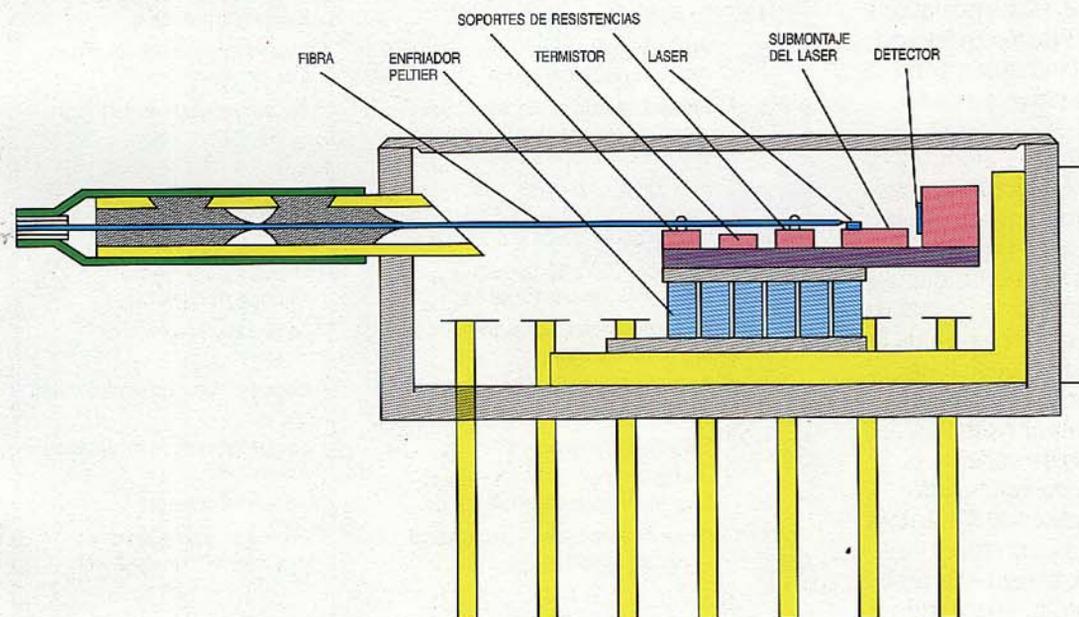


Figura 3
Esquema de un módulo láser, mostrando los distintos componentes.

láser dependen fuertemente de la temperatura. Por ello, en todas las aplicaciones donde se requiere un amplio margen de temperaturas – por ejemplo, la transmisión terrenal – la temperatura del láser se regula con un pequeño enfriador por efecto Peltier ubicado bajo el disipador.

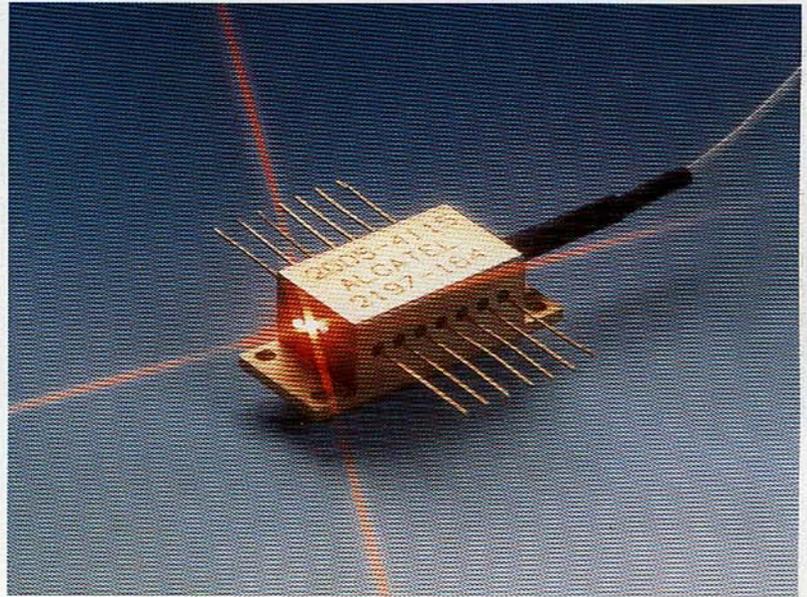
Por último, para incrementar la potencia óptica acoplada a la fibra, se forma en su extremo una microlente.

La tabla 3 describe las principales etapas de montaje y ensamble requeridas para producir el módulo láser de la figura 3.

Los pasos más críticos del ensamble son los que atañen a la fibra: formación de la microlente, alineamiento y fijación de la fibra misma. Para optimizar el acoplamiento entre la fibra y el láser y reducir al mínimo la realimentación de luz reflejada hacia la capa activa, se decidió utilizar una fibra de estrechamiento progresivo terminada en una semiesfera (que actúa como microlente), con preferencia a otras formas. Tanto el rendimiento del acoplamiento como la estabilidad respecto a la temperatura dependen de las características de dicha terminación. Al aumentar el diámetro de la microlente y la separación entre la cara del láser y la terminación de la fibra, la estabilidad térmica mejora pero se reduce la potencia acoplada. Tales diámetro y separación se eligen de acuerdo con el factor que deba optimizarse, bien la estabilidad o bien la potencia acoplada.

La conicidad de la fibra se logra calentando y estirando su extremo una vez reblandecido el vidrio, formándose entonces una microlente por fusión rápida en arco eléctrico. Finalmente se metalizan unos 30 mm del extremo de la fibra para que ésta pueda luego soldarse. Antes de ello, los dos portafibras y el láser colocado sobre su disipador se sueldan a una placa grande de óxido de berilio. Cada portafibra es un pequeño circuito híbrido provisto de una resistencia de película delgada con grandes contactos metalizados en cada extremo.

El alineamiento láser-fibra se efectúa de modo dinámico mientras funciona el láser, por lo que se conoce en todo momento la potencia óptica acoplada a la fibra. Primero se deposita la fibra en los correspondientes soportes, a la distancia apropiada de la cara tallada del láser. A continuación se alinea la fibra con el láser mediante un posicionador x/y que optimiza la potencia acoplada. Se hace pasar luego una corriente a través de la primera resistencia, que se calienta y funde con rapidez un hilo de soldadura depositado sobre ella, quedando fija la fibra metalizada cuando cesa la corriente y se enfría la soldadura. Análogamente se fija la fibra a la segunda resistencia, reforzando



Módulo óptico de láser, con encapsulado tipo mariposa.

así la sujeción y aislando la primera fijación de los esfuerzos mecánicos más importantes. En la etapa siguiente se suelda la fibra al tubo de salida. Por último se sella el encapsulado en atmósfera de nitrógeno seco con una máquina eléctrica de sellado de juntas o, más recientemente, con un láser del tipo YAG de alta potencia.

Tabla 3 – Etapas principales en el ensamble del módulo láser

Etapa	Montaje y ensamble	Equipo
1	Talla de la pastilla láser	Sierra de diamante para iniciar el corte
2	Unión de pastilla a su soporte	Máquina de soldadura del soporte
3	Soldadura del hilo de conexión	Máquina de soldadura de hilo
4	Prueba de la pastilla láser	Equipo de prueba
5	Procedimiento de selección con láseres en submonturas	Equipo de pruebas selectivas y de envejecimiento
6	Ensamble de la submontura láser, termistor, fotodiodo de supervisión, soportes de resistencias, en híbrido cerámico	Soldadura por fase de vapor
7	Inserción del enfriador Peltier y del híbrido cerámico en el encapsulado	Herramienta específica
8	Conexión de cada dispositivo a los terminales del encapsulado	Máquina de soldadura eléctrica de hilos
9	Alineamiento y fijación del tallo de fibra metalizado	Equipo de alineamiento dinámico
10	Fase de estabilización mediante ciclo térmico	Equipo de prueba normalizado
11	Sellado de la caperuza	Equipo de sellado de juntas o láser YAG
12	Impresión del número de serie	Máquina impresora
13	Procedimientos de selección final de módulos láser	Equipo para pruebas de selección y envejecimiento en módulos láser

Se debe a Alcatel CIT la introducción de este método de fijación mediante dos soportes resistivos y una máquina de alineamiento que permite ajustar la posición con gran exactitud. Para poder apreciar la precisión que se exige a esta máquina, adviértase que si la fibra se desplaza sólo una micra desde su posición óptima el rendimiento del acoplamiento desciende un 50%. Ello también explica que haya de tenerse en cuenta la dilatación térmica de cada elemento utilizado en el módulo para impedir la degradación térmica y minimizar las variaciones de acoplamiento.

Este procedimiento de fijación permite obtener características repetitivas muy parecidas. Típicamente los módulos láser en encapsulados de tipo mariposa o en doble fila presentan rendimientos de acoplamiento del 25%, con sólo un 10% de variación (respecto al valor obtenido a temperatura ambiente) en todo el margen de temperaturas de funcionamiento, de -20 a +70°C.

Selección de los dispositivos

Aun con tecnologías consolidadas, se necesita un procedimiento de selección para garantizar que cada lote de dispositivos producidos es idóneo para las extremas condiciones de funcionamiento requeridas, y además se detectan y rechazan las unidades débiles, defectuosas y marginales que no cumplen totalmente las especificaciones ni ofrecen las prestaciones esperadas.

El módulo láser debe considerarse más como subunidad optoelectrónica que como componente discreto, pues contiene una serie de dispositivos distintos que no pueden probarse conjuntamente de manera efectiva una vez ensamblados al no poder soportar los mismos esfuerzos. En consecuencia, cada dispositivo debe seleccionarse por separado antes de proceder al ensamble. No obstante, los módulos láser también han de someterse a pruebas y procedimientos de selección adecuados, dado que sus parámetros finales de operación dependen del acoplamiento e interacción de sus distintas partes.

Los métodos de selección se basan en cálculos estadísticos de parámetros y en la medida de sus variaciones a lo largo de las pruebas. Tales datos constituyen un eficaz instrumento para supervisar y contrastar la calidad de los dispositivos fabricados, y descubrir los que salgan defectuosos. Todas las medidas y cálculos se almacenan en ordenador, y van formando una base de datos cuya extensión e importancia en el proceso de fabricación crece con el tiempo.

La selección de láseres comprende la elección de obleas por muestreo, y dos

etapas individuales de pruebas selectivas y de envejecimiento. Estas dos últimas se efectúan tras haber montado las pastillas sobre sus disipadores, y una vez ensamblados los módulos láser, respectivamente.

Los principales procesos de fallo de los láseres conducen a tener que incrementar la corriente de excitación para mantener la potencia óptica de salida a un nivel constante. En consecuencia, dicha corriente de excitación es un parámetro fundamental indicativo de la fiabilidad. En el módulo láser, los mecanismos de fallo suelen estar ligados al rendimiento de acoplamiento. Las pruebas de selección de módulos láser se han de hacer a temperaturas bajas, para que la fibra no sufra daño, y su objetivo es el de verificar la estabilidad a largo plazo de dicho rendimiento. Durante el envejecimiento, la corriente de excitación debe observarse cuidadosamente, pues basta una pequeña deriva de este parámetro para acusar una degradación de la pastilla producida durante el proceso de ensamble.

Alcatel CIT ha diseñado equipo especializado para pruebas selectivas y envejecimiento de láseres en disipadores y módulos láser, respectivamente, en modo de control automático (es decir, a potencia óptica constante) en un amplio margen de temperaturas de funcionamiento. Este equipo puede determinar con gran precisión la corriente de excitación y el rendimiento de acoplamiento. Cada montaje de prueba se conecta a un ordenador central que calcula la deriva de los parámetros con respecto al tiempo y edita los ficheros que sean necesarios. En total, el equipo dispone de unas 2500 posiciones, utilizadas para tareas de producción y evaluación de tiempos de vida. Los componentes destinados a aplicaciones terrestres y submarinas siguen procedimientos de selección semejantes, si bien para sistemas submarinos la diversidad y duración de las pruebas y los esfuerzos aplicados son notablemente mayores¹.

La fiabilidad del componente depende del grado de exigencia adoptado en el criterio de selección. Con niveles de exigencia menores, el tiempo de vida de un láser rebasa las 500.000 horas, y la estabilidad del acoplamiento del módulo es mejor que 2 dB en 10 años. Los rigurosos criterios de las aplicaciones submarinas, conducen a respectivos valores de 10⁷ horas y 2 dB en 25 años, en tales parámetros.

Los estudios de fiabilidad realizados en Alcatel han conducido a determinar los procesos de fallo más relevantes y, en particular, las leyes que gobiernan los mecanismos de "desgaste" con el tiempo, las cuales permiten predecir con exactitud la vida útil de los láseres.

Módulo PINFET

El módulo PINFET es un receptor óptico de alto rendimiento, que combina un fotodiodo PIN con un preamplificador de transimpedancia de bajo ruido basado en FET.

Fotodiodo PIN

El fotodiodo PIN, desarrollado y producido en el Centro de Investigación de Alcatel SEL, es el componente clave del módulo PINFET y puede utilizarse en varios receptores distintos. La figura 4 muestra una sección transversal de un fotodiodo de InGaAs/InP, con una estructura del tipo "mesa"^{2,3}.

El perfil lateral de la mesa se obtiene por ataque químico del InGaAs hasta el sustrato de InP, seguido de una pasivación con poliimida. Esta estructura ofrece una serie de mejoras de rendimiento; en efecto, la luz ($\lambda > 1000 \text{ nm}$) penetra por la parte posterior del fotodiodo, atraviesa el sustrato InP sin pérdidas y luego es absorbida en la capa *n* de InGaAs; al no tener que atravesar la superficie de la mesa, puede reducirse el diámetro de la misma hasta la dimensión suficiente para asegurar una unión efectiva.

Los parámetros más importantes son su pequeña capacidad (típicamente 0,2 pF) y una baja corriente de oscuridad, en torno a 1 nA. La vida útil en funcionamiento es, por otra parte, superior a 10 años, incluso a 70°C. Estos excelentes valores son esenciales para que el módulo PINFET alcance las prestaciones requeridas.

La figura 5 ilustra el programa de calidad correspondiente a los fotodiodos PIN, el cual abarca todas las etapas de producción y permite identificar cada fotodiodo juntamente con los datos asociados.

Montura del fotodiodo y adhesión del tallo de fibra

En el caso del módulo PINFET, el fotodiodo se monta sobre un sustrato de película delgada, soldando la pastilla y los hilos de conexión. Después se miden y registran en gráficos los parámetros del semiconductor antes y después de un proceso de maduración, y se rechazan todos los de escasa calidad. Finalmente se mide el rendimiento cuántico (el número de portadores generados por fotón incidente), enfocando la luz producida por una fuente de luz de alta estabilidad a la parte trasera del fotodiodo PIN, a través de un orificio en el sustrato.

La etapa siguiente consiste en preparar la fibra de vidrio para acoplarla al fotodiodo. Se suelda una fibra metalizada dentro de un tubo de metal y se recorta el extremo libre de la misma a unos 1,5 mm. A continuación se funde dicho extremo en un arco de alta frecuencia, formandose una lente esférica

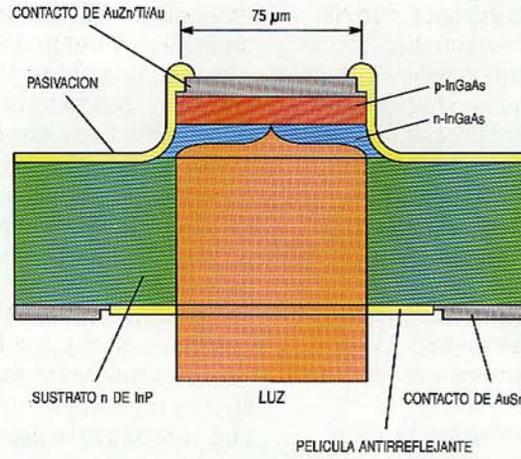


Figura 4
Sección transversal del sustrato de un fotodiodo PIN.

bajo la influencia de la tensión superficial de la propia fibra. Esta lente tiene que enfocar la luz a una distancia aproximada de 30 µm.

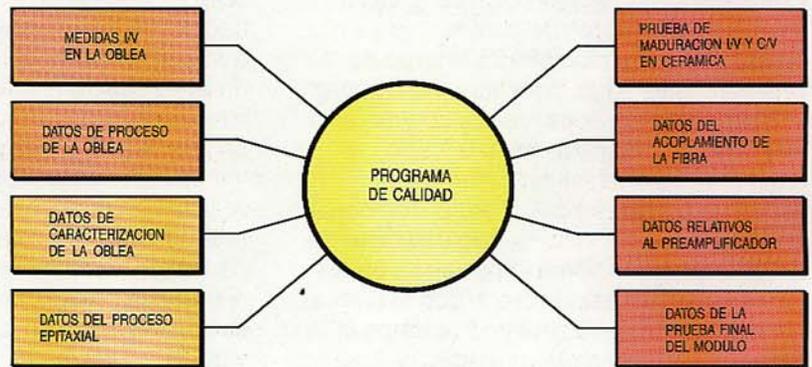
El conjunto del sustrato y el fotodiodo se inserta en un soporte apropiado para realizar las conexiones eléctricas necesarias. La fibra, dentro del tubo de metal, se desplaza con un manipulador hasta situarla justo enfrente del fotodiodo; su posición final se ajusta entonces según los tres ejes de coordenadas hasta optimizar la corriente de salida, fijando seguidamente esa posición mediante soldadura, lo que además asegura una juntura hermética entre la fibra óptica y el soporte del fotodiodo.

Para realizar los pasos descritos se requieren técnicas refinadas y una considerable experiencia. La figura 6 muestra la subunidad al terminar esta etapa.

Preamplificador y ensamble final

Dependiendo de la aplicación, se utilizan en los módulos PINFET preamplificadores de película delgada o de película gruesa. Los módulos destinados a sistemas de transmisión de largo alcance utilizan sustratos de película delgada con redes de resistencias integradas y condensadores de pastilla soldados al sustrato directamente y por hilos. Por otra parte, los módulos para redes locales emplean sustratos de película

Figura 5
Programa de calidad para un módulo PINFET.



gruesa y dispositivos montados en superficie. En ambos casos, la resistencia de transimpedancia se genera sobre un sustrato cristalino con tecnología de película delgada.

Todas las subunidades se montan luego conjuntamente y se conectan por hilos soldados, tras lo cual el módulo PINFET se prueba eléctricamente y, en caso necesario, se ajusta y adapta también por medios eléctricos. La fabricación finaliza cerrando el módulo con una caperuza que provee un encapsulado hermético. Las pruebas de fugas y las inspecciones eléctricas finales sirven para acreditar la calidad del módulo. Se obtienen así sensibilidades notablemente elevadas, del orden de -42 dBm, y tasas de errores de bit de 10^{-10} a 140 Mbit/s.

y ha utilizado estos componentes en un sistema que trabaja a 2,2 Gbit/s.

Los incrementos de la capacidad y del vano entre repetidores seguirán siendo los grandes objetivos de los sistemas de transmisión de largo alcance en la próxima década. Para llegar a ellos, los sistemas necesitarán dispositivos con prestaciones todavía mejores, alta monocromaticidad, potencias ópticas de transmisión elevadas, receptores de gran sensibilidad y altos valores de estabilidad y fiabilidad global. Dentro de pocos años, los sistemas de transmisión coherente exigirán fuentes láser de alta estabilidad con longitud de onda sintonizable. Todos estos componentes se fabricarán utilizando elaboradas tecnologías que permitan un control muy preciso del creci-

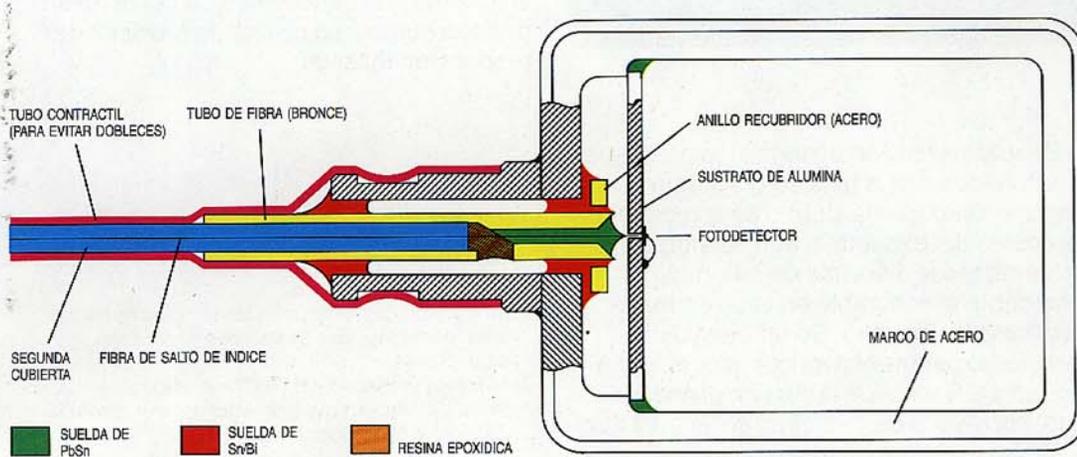


Figura 6
Soporte con el fotodiodo PIN acoplado a la fibra óptica.

Evolución de la fabricación

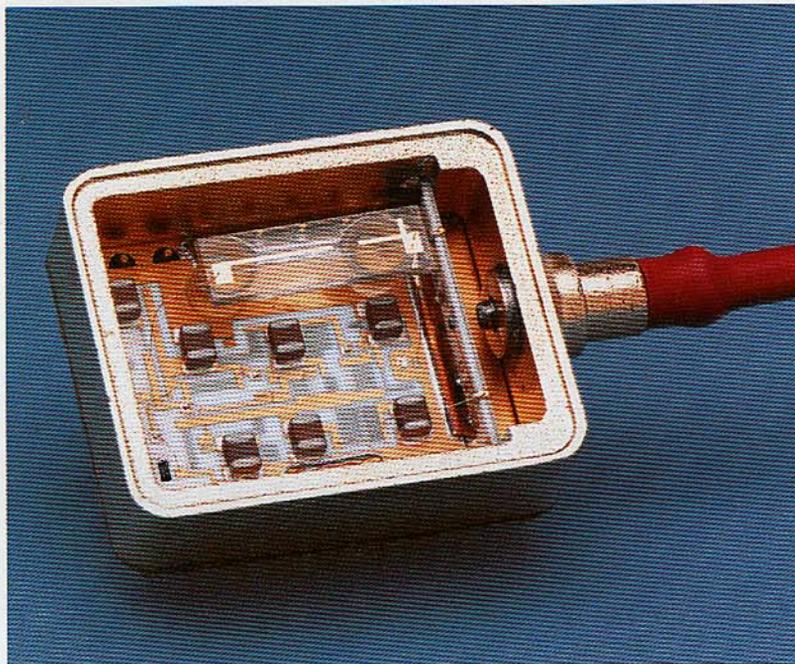
Los actuales sistemas de transmisión óptica de largo alcance operan con fibras ópticas monomodo en la segunda o la tercera ventana de atenuación (1300 y 1550 nm, respectivamente), utilizando láseres del tipo Fabry-Pérot y fotodiodos PINFET o de avalancha de germanio. El vano de repetición cubierto depende de parámetros como la velocidad de transmisión, las características de la fibra, y las prestaciones del transmisor y receptor. Los sistemas comerciales de hoy ofrecen vanos comprendidos entre 50 km (560 Mbit/s a 1300 nm) y 150 km (140 Mbit/s a 1550 nm).

Los sistemas de la siguiente generación emplearán láseres monocromáticos (láseres que trabajan en una sola longitud de onda) y fotodiodos de avalancha de InP de alta sensibilidad, con el fin de obtener velocidades de transmisión aún más elevadas. Alcatel ha comenzado ya a producir láseres monocromáticos de realimentación distribuida y fotodiodos InP de avalancha,

miento epitaxial. En el momento actual, las tecnologías más atractivas en este sentido, con ventajas significativas respecto a las técnicas LPE, son la MOVPE y la MBE (epitaxia de metales orgánicos en fase de vapor y epitaxia de haces moleculares, respectivamente).

Dado que el coste de los refinados componentes ópticos influye cada vez más en el coste total del sistema, habrá que reducir los costes de producción de dichos componentes para mantenerse en niveles competitivos. Los principales aumentos de productividad provendrán del proceso de obleas de 2 pulgadas de diámetro y de métodos de ensamble aún más automatizados.

Las tecnologías MOVPE y MBE vuelven a resultar atractivas, ya que permitirán el proceso de obleas de mayores diámetros, aumentando así espectacularmente el número de pastillas por oblea. Se espera que estas técnicas consigan reducir los costes de producción en un factor superior a diez con respecto a los procesos LPE.



Módulo PINFET con sustrato de película delgada y resistencia de transimpedancia de película delgada.

La automatización de todos los procesos relacionados con la fibra se considera un objetivo fundamental dentro de la reducción de costes del ensamble, aun cuando se ha comprobado la dificultad de automatizar totalmente el ensamble en caso de manipularse tallos de fibra. Se utilizan ya con carácter experimental robots para el alineamiento y la fijación de la fibra en el encapsulado, con ayuda de destellos de láseres tipo YAG. Otros robots podrían encargarse de producir el estrechamiento de la fibra en su extremo, así como de otras operaciones hoy realizadas manualmente.

Siguiendo directrices de Laboratoires de Marcoussis y del Centro de Investigación de Alcatel SEL, las casas fabricantes de Alcatel están introduciendo estas nuevas tecnologías con el fin de incrementar sustancialmente la productividad del proceso de obleas y del ensamble de dispositivos.

Es difícil predecir cuándo se introducirán en gran escala la RDSI de banda ancha y la distribución de TV por fibra, pero está claro que ello exigirá componentes poco costosos. Tales sistemas requerirán emisores y receptores "conectorizados", es decir una pastilla montada en un encapsulado coaxial estándar, sin tallo de fibra, y alojada directamente en un conector óptico. Esta clase de componentes, que permiten un ensamble totalmente automático, son mucho más adecuados para la producción masiva.

Conclusiones

Como sucede en toda industria innovadora, un alto nivel de investigación, un ciclo corto

de desarrollo y una elevada productividad son los factores clave para la producción de componentes microelectrónicos y optoelectrónicos con buenas prestaciones. Por consiguiente se requiere una fuerte inversión que apoye la investigación y el desarrollo necesarios, así como la preparación y adquisición de equipo de fabricación totalmente automático.

Dado que el coste de los componentes optoelectrónicos ha asumido una porción más importante del coste del sistema completo, Alcatel ha emprendido un programa continuo de aumento de la productividad de la fabricación, para garantizar que todos sus sistemas sigan siendo competitivos en coste. Para ello se optimizan los factores que inciden en la productividad, tales como la racionalización, la organización y las especificaciones, con el fin de aprovechar al máximo las reducciones de coste que pueden obtenerse utilizando técnicas de producción masiva.

Referencias

- 1 J.-P. Pestie, P. Franco, F. Gobin y P. Durand: Reliability Objectives Redundancy, Selection Procedure and Results: *SUBOPTIC Conference*, 18 a 21 de febrero 1986, Versailles, Francia.
- 2 W. Kuebart: Fotodetektoren für die optische Nachrichtenübertragung: *Der Elektroniker*, mayo 1986, págs. 33-44.
- 3 H. Haupt, J. Henein y H.-P. Vollmer: Optische Halbleitersender und -empfänger: *Nachrichtentechnische Zeitschrift*, 1986, págs. 462-472.

Claude Amouroux nació en 1941. En 1970 se graduó Master en química por la Universidad de París V. En 1964 entró en Laboratoires de Marcoussis para trabajar en el campo de circuitos integrados bipolares y fotodetectores, trasladándose después a Alcatel SC donde dirigió la fabricación de ordenaciones de puertas CMOS. Desde 1984, el Sr. Amouroux es responsable del grupo de componentes optoelectrónicos en el CSO de ATC, la división de transmisión de Alcatel CIT.

Jean-Pierre Pestie nació en 1939. Se graduó en física por la Ecole Nationale de Chimie de París en 1961, obteniendo el grado de ingeniero en 1969. En 1964 entró en Laboratoires de Marcoussis, donde trabajó en el campo de los transistores bipolares para microondas. Desde 1976, el Sr. Pestie lidera el CSO de ATC, división de transmisión de Alcatel CIT. Recientemente ha asumido la responsabilidad del sector de componentes en la Dirección Técnica de ATC.

Ingo Rudiger Isert nació en 1941. Estudió física en la Universidad Técnica de Munich, graduándose en 1968. Seguidamente trabajó durante dos años como adjunto en la Universidad de Stuttgart, dentro del campo de las células solares. En 1981 el Sr. Isert ingresó en SEL, inicialmente como jefe de proyecto en el área de desarrollo y posteriormente en la de producción. Actualmente es responsable de la producción de híbridos, y de módulos y componentes microelectrónicos y optoelectrónicos de Alcatel SEL.

Especificación, diseño, prototipos y verificación de sistemas de programación

Es muy difícil desarrollar por medios tradicionales sistemas de programación exentos de errores, necesitándose una depuración intensiva que obliga a añadir considerables costes y esfuerzos. Las técnicas formales ofrecen un nuevo enfoque que promete simplificar el desarrollo de la programación y mejorar su fiabilidad y rentabilidad.

J. De Man

L. Duponcheel

W. Van Puymbroeck

Alcatel Bell Telephone, Amberes, Bélgica

R. Pérez Domínguez

Alcatel Standard Eléctrica, Madrid, España

Introducción

Las técnicas formales constituyen un modo nuevo de facilitar y hacer más fiable y rentable el desarrollo de sistemas de programación. El uso de estas técnicas permite definir de manera precisa y sin ambigüedades un sistema antes de su realización física, lo que además confiere rigor al razonamiento sobre las descripciones de dicho sistema. Por tanto, el desarrollo de especificaciones formales complementa la escritura de descripciones informales, normalmente realizada en lenguajes naturales.

Por múltiples razones las técnicas formales se utilizan todavía muy poco, y entre ellas figuran tanto la escasez de entornos adecuados de soporte a la programación como la deficiente instrucción de los potenciales usuarios. Sin embargo, la situación cambia rápidamente a medida que las especificaciones formales pasan de los centros de investigación a las aplicaciones reales. El trabajo de Alcatel se ha concentrado esencialmente en mejorar el uso práctico de estas técnicas mediante la introducción de principios de *ingeniería de programación* (por ejemplo, ayudas al tratamiento de la modularización y de las excepciones), y el desarrollo de lenguajes de especificación ejecutables con sus herramientas soporte. Tales herramientas son importantes porque ayudan a elaborar con rapidez prototipos de sistemas, que pueden dar al usuario una pronta indicación de los resultados y detectar los errores de especificación en las primeras etapas.

Desarrollo de sistemas de programación

El modelo tradicional de la vida útil de un sistema de programación es un modelo en *cascada*, que identifica una serie de fases sucesivas desde la especificación de requisitos hasta el momento en que deja de utilizarse el sistema. Este proceso no es puramente secuencial, y pueden señalarse varios ciclos de iteración. Aunque a menudo pueden detectarse pequeños errores de codificación durante la compilación o en las primeras pruebas de módulos, los errores más cruciales suelen cometerse en los comienzos del ciclo de desarrollo y tal vez no se descubren hasta el final del mismo, cuando la corrección es lenta y costosa ya que puede afectar a todas las fases de dicho ciclo. Otro problema es que no hay manera de garantizar la coherencia entre documentos producidos en diferentes fases.

El enfoque de Alcatel evita estos problemas mediante la aportación de métodos y herramientas para especificación de sistemas. La fase de especificación sólo considera la funcionalidad del sistema, y pasa por alto los detalles de realización. Tradicionalmente, su resultado es un texto en gran medida informal, difícil de comprobar e inadecuado para el diálogo con el usuario. Alcatel aboga por la creación de una especificación formal y ejecutable cuyo análisis y "animación" permita la pronta detección y eliminación de errores, y que constituya una entrada precisa y verificable para la fase de realización siguiente.

La formalización se persigue desde el comienzo del desarrollo, a fin de poder expresar y tal vez verificar automáticamente las propiedades deseables del sistema. Los errores cometidos durante la fase de especificación pueden así detectarse y corregirse tempranamente.

Las especificaciones han de ser ejecutables, de manera que puedan probarse o animarse para que el cliente conozca pronto la reacción del sistema. La rápida obtención de un prototipo añade las ventajas de este enfoque del desarrollo de sistemas a las propias del desarrollo por especificaciones. El resultado es una descripción bien estructurada, ejecutable y clara, fácil de mantener y modificar. Un documento así es indispensable cuando varios diseñadores han de trabajar juntos en un sistema.

Especificación y diseño de sistemas de programación

Especificaciones y estilos de especificación
El enfoque de Alcatel se centra en las especificaciones algebraicas por su rigor mate-

cribe un sistema expresando sus propiedades (qué es lo que hace).

La figura 1 especifica una lista de números naturales con una función que invierte tal lista. Distinguimos entre los constructores y las funciones definidas, llamadas operadores. Aquéllos generan los elementos de un tipo de datos, mientras que éstos definen acciones útiles sobre los datos. En el ejemplo, la estructura de datos *List* se construye con *Nil*, que representa una lista vacía, y *AddToLeft* que añade un número natural a la izquierda de la lista. Los operadores son *AddToRight* y *Reverse*. En esta especificación sólo hay axiomas para los operadores (también pueden definirse axiomas para los constructores). Por ejemplo, *Reverse* se define así: la inversa de una lista vacía es la lista vacía, y la inversa de una lista no vacía se obtiene colocando la cabeza de la lista detrás del inverso de la cola de la lista. El último axioma emplea recursión, y ello quiere decir que la definición de *Reverse* se utiliza a sí misma. La recursión es un mecanismo importante para definir el significado o comportamiento de las operaciones.

En este contexto pueden adoptarse diferentes estilos de especificación, que van desde los *axiomáticos* a los *constructivos*. Las especificaciones axiomáticas no hacen distinción entre constructores y operadores, de forma que no les afecta expresamente cómo se representa el tipo de datos. Esta clase de especificaciones pueden servir para expresar requisitos. En las constructivas, los operadores se definen describiendo su efecto sobre términos que constan solamente de constructores, como en la figura 1. Estas restricciones facilitan la comprobación de propiedades útiles de las especificaciones, tales como la integridad, aunque frecuentemente a costa de producir unas descripciones más *orientadas a la implantación*.

Dentro del marco esbozado puede especificarse parcialmente un sistema expresando las propiedades que debe tener; el hacer esto de un modo formal presenta la ventaja de poder comprobar tales propiedades durante el desarrollo del sistema.

Figura 1 – Especificación del tipo abstracto de datos *List*

Generos <i>List</i> ;
Constructores
$Nil: \rightarrow List;$
$AddToLeft: Nat \times List \rightarrow List;$
Operadores
$AddToRight: List \times Nat \rightarrow List;$
$Reverse: List \rightarrow List;$
Declaración (de variables)
$l: List;$
$n, n_1, n_2: Nat;$
Axiomas (de operadores)
$AddToRight (Nil, n_2) = AddToLeft (n_2, Nil);$
$AddToRight (AddToLeft (n_1, l), n_2)$
$= AddToLeft (n_1, AddToRight (l, n_2));$
$Reverse (Nil) = Nil;$
$Reverse (AddToLeft (n, l)) = AddToRight (Reverse (l), n);$

mático, su facilidad para expresar un sistema con nivel adecuado de abstracción y su generalidad (capacidad de adecuación a numerosas aplicaciones).

Una especificación algebraica tiene dos partes: signatura y axiomas. La signatura consiste en una declaración de los tipos de datos y las operaciones involucrados; los axiomas expresan el significado de las operaciones. En lugar de *determinar* un algoritmo (*cómo lo hace*), cual sucede en la programación tradicional, un usuario des-

Mecanismos de estructuración

El lenguaje de especificación debe prestar soporte al diseño y mantenimiento de grandes sistemas de programación; para ello se considera al sistema compuesto de unidades de especificación más pequeñas y manejables, que funcionan conjuntamente.

Dichas unidades son módulos parametrizables, formado cada uno por:

- La descripción del interfaz, que podría comprender los *requisitos* – descripción

de los parámetros formales en cuanto a condiciones sintácticas y semánticas — y las *importaciones-exportaciones*, es decir, qué utiliza el módulo de su entorno y con qué contribuye al mismo (entre otras cosas, esto permite ocultar información que no debe ser pública).

- El cuerpo, que define los elementos de un módulo.

Un módulo con parámetros expresados por requisitos especifica un tipo abstracto de datos reutilizable. Las especificaciones de tipos de datos concretos se obtienen instanciando tales módulos, o sea, dando valores reales a los parámetros formales especificados en los requisitos. Los módulos forman una jerarquía que les permite ser (re)utilizados con seguridad mientras se cumplan las condiciones jerárquicas.

La figura 2 ilustra los mecanismos de estructuración mediante la especificación de una lista genérica. El módulo está parametrizado: el parámetro formal es del tipo *Elem*, lo cual indica que en la estructura de datos *List* no importa la naturaleza de los elementos de la lista, que pueden ser enteros o incluso listas a su vez. A otros módulos se les impide utilizar el operador *AddToRight*, ocultando así este operador según se indica en la cláusula de exportación. La inversión (*Reverse*), que usa como función auxiliar *AddToRight*, se puede utilizar en todo módulo que importe el módulo *List*.

El lenguaje posee muchas más características que permiten escribir especificaciones claras y concisas. Es similar a otros lenguajes modernos de especificación, con idénticos fines de modularidad, parametrización y capacidad de reutilización, y ofrece soluciones concretas. No obstante, no se tratan algunos desarrollos recientes como la lógica ecuacional con jerarquías de tipos ("order-sorted"), que proporciona una base rigurosa para la herencia múltiple.

Obtención rápida de prototipo y verificación de sistemas de programación

Un protocolo sencillo

El ejemplo mostrado es un sencillo protocolo de establecimiento de llamada para la estación de destino. La instauración en el destino de un modo que permita aceptar datos, exige que éste reciba dos veces una *indicación de activación* ("setup"). Un nodo de origen puede indicar que *no está preparado* ("not ready") para enviar datos.

El protocolo se modela con una máquina de estados finitos que admite cuatro estados: q_0 , el estado inicial; q_1 , la otra estación está preparada; q_2 , la otra estación no está preparada; y q_3 , dispuesto a recibir datos.

Figura 2 — Especificación del tipo parametrizado de datos List

```
Módulo List;
  Requirement Elem;
  Sort Element;
  Export All Except AddToRight;
/*
  Especificación dada en figura 1
  con "Nat" cambiado a "Element".
*/
End Módulo List;
```

Figura 3 — Especificación de un protocolo sencillo

```
Géneros State, Action;
Constructores
   $q_0, q_1, q_2, q_3 \rightarrow \text{State};$ 
   $a_0, a_1 \rightarrow \text{Action};$ 
Operadores
  Next: State  $\times$  Action  $\rightarrow$  State;
Declaración a: State;
Axiomas de operadores
  Next ( $q_0, a_0$ ) =  $q_1$ ; /* 1 */
  Next ( $q_0, a_1$ ) =  $q_2$ ; /* 2 */
  Next ( $q_1, a_0$ ) =  $q_3$ ; /* 3 */
  Next ( $q_1, a_1$ ) =  $q_2$ ; /* 4 */
  Next ( $q_2, a_0$ ) =  $q_1$ ; /* 5 */
  Next ( $q_2, a_1$ ) =  $q_2$ ; /* 6 */
  Next ( $q_3, a$ ) =  $q_3$ ; /* 7 */
Géneros List;
Constructores
  Nil:  $\rightarrow$  List;
  Add: Action  $\times$  List  $\rightarrow$  List;
Operador
  Beh: State  $\times$  List  $\rightarrow$  State;
Declaración
  s: State; a: Action; l: List;
Axiomas de operador
  Beh (s, Nil) = s; /* 8 */
  Beh (s, Add (a, l)) =
  Beh (Next (s, a), l); /* 9 */
```

Hay dos acciones posibles: a_0 — activar; a_1 — desactivar. El protocolo se especifica en la figura 3, junto con una lista de acciones y el comportamiento (Beh) de la máquina para esa lista.

De modo general pueden plantearse varias preguntas interesantes:

- Dado un estado y una lista de acciones, ¿en qué estado queda la máquina cuando se han realizado todas las acciones?
- Dados dos estados, ¿qué listas de acciones cambian la máquina del primer estado al segundo?

- Dados dos estados y un conjunto (tal vez infinito) de listas de acciones, ¿es cierto que todas las listas de acciones del conjunto cambian la máquina del primer estado al segundo?.

Hay una clara diferencia entre las tres preguntas. La primera se relaciona con la *evaluación*, la segunda con la *satisfacibilidad*, y la última con la *validez*. La programación tradicional sólo puede contestar la primera pregunta, mientras que este marco de especificaciones permite abordar las tres de manera elegante.

Evaluación

Las ecuaciones pueden utilizarse para realizar el cálculo del valor de términos o expresiones funcionales, básicamente reemplazando *iguales por iguales*. Siendo esto en principio sencillo, es de difícil automatización porque una misma ecuación puede tomarse de izquierda a derecha y de derecha a izquierda. Mejor sería, pues, orientar las ecuaciones en un solo sentido. Las ecuaciones así orientadas se llaman *reglas de reescritura*, y un conjunto de tales reglas forman un *sistema de reescritura*.

El algoritmo de Knuth-Bendix (llamado de *completamiento*) intenta convertir un conjunto dado de axiomas en un *sistema de reescritura de términos* equivalente. Sin entrar en detalles, se trata esencialmente de orientar las ecuaciones y calcular consecuencias a partir de ellas, considerando los llamados pares críticos. Sin embargo, el procedimiento Knuth-Bendix no siempre da buen fruto, como sucede en el caso de no poder orientar una ecuación o de que el procedimiento genere indefinidamente nuevas consecuencias ecuacionales.

De aquí en adelante se supone que las especificaciones forman un sistema de reescritura de términos convergente. Los términos o expresiones se construyen a partir de símbolos de operación y variables, y su evaluación es funcionalmente similar a la ejecución de un programa tradicional, aunque el paradigma de cálculo es bastante diferente. El mecanismo básico usado es el de *ajuste de patrones* ("pattern matching"). La evaluación de un término se desarrolla así:

- una regla $l \rightarrow r$ se puede aplicar a un término t si l concuerda con un subtérmino s de t con alguna sustitución σ de variables por términos en l
- la regla se aplica sustituyendo el subtérmino s_σ de t por r_σ
- el cálculo se detiene cuando no puede aplicarse ninguna regla; los términos iniciales se han simplificado a su *forma normal*, que constituye el resultado de la evaluación.

Este proceso de evaluación suele denominarse *reescritura (de términos)*.

Si el sistema de reescritura de términos es convergente, se garantiza una única forma normal, como es de desear: el resultado de la reescritura no debe depender de la estrategia seguida al reescribir. Se dice que un sistema de reescritura es convergente cuando termina y es además confluente. La terminación significa que no hay infinitas secuencias de reescritura, mientras que la confluencia, o propiedad Church-Rosser, indica que el orden en que se realiza la reescritura es irrelevante.

La figura 4 ilustra la reescritura de términos con el ejemplo del protocolo. Se elabora la reescritura del término

Beh (q_0 , Add (a_0 , Add (a_1 , Nil)))

Las reglas utilizadas en el proceso de reescritura se referencian por un número que se indica en la figura 3. Para cada aplicación de una regla se muestra la asignación ("binding") de las variables - obtenida por ajuste de patrones - y el resultado. El resultado final de la reescritura es el estado q_2 ; adviértase que otras secuencias de reescritura darían el mismo resultado.

La reescritura de términos, tal como se explica aquí, es un proceso de interpretación bastante lento en las actuales arquitecturas de ordenador. Puede mejorar su rendimiento adoptando las técnicas usuales para optimizar compiladores de lenguajes de programación. Se ha desarrollado un compilador para especificaciones constructivas, el cual toma una especificación y produce un programa equivalente en un lenguaje de alto nivel. Durante el proceso de compilación se optimizan las operaciones de ajuste de patrones y de aplicación de las reglas.

Satisfacibilidad

En esencia, el problema de la satisfacibilidad corresponde a la resolución de ecuacio-

Figura 4 - Ilustración de la reescritura de términos

Regla	Asignación	Resultado
* 9 */	s to q_0 a to a_0 l to Add (a_1 , Nil)	Beh (Next (q_0 , a_0), Add (a_1 , Nil))
* 1 */		Beh (q_1 , Add (a_1 , Nil))
* 9 */	s to q_1 a to a_1 l to Nil	Beh (Next (q_1 , a_1), Nil)
* 8 */	s to Next (q_1 , a_1)	Next (q_1 , a_1)
* 4 */		q_2

nes, o sea, a averiguar para qué valores de variables es válido un conjunto de ecuaciones según una especificación determinada. El mecanismo básico utilizado para ello es la *unificación*.

El algoritmo que comprueba la satisficibilidad es un algoritmo de *unificación ecuacional* ("narrowing") que básicamente consta de dos etapas:

- Se busca el unificador más general σ de l en una regla $l \rightarrow r$ con un subtérmino t en el miembro de la izquierda o de la derecha de una ecuación. Si lo hubiere, el subtérmino t se reemplaza por r_σ .
- Si existe un unificador de máxima generalidad de los miembros izquierdo y derecho de una ecuación, ésta se suprime. Se llega a una solución cuando todas las ecuaciones han podido suprimirse.

La unificación ecuacional implica la posibilidad de retrocesos ("backtracking"), deshaciendo las unificaciones hechas y buscando caminos alternativos hacia las soluciones.

contengan dos acciones consecutivas a_0 satisfacen la ecuación anterior.

Validez

En el punto anterior se ha expuesto el modo de probar que las ecuaciones se satisfacen para algún valor de sus variables. Sin embargo, constituye un reto demostrar que un conjunto de ecuaciones se satisface para todos los valores de sus variables. Por supuesto, la verificación de sistemas se ha considerado de la máxima importancia desde los primeros tiempos de la ciencia informática, pero no se hicieron grandes progresos con la programación tradicional. Las técnicas de verificación dentro del marco de la reescritura están avanzando rápidamente, y mejorando tanto la potencia del método de prueba como su eficiencia. Queda, sin embargo, mucha investigación por hacer antes de poder aplicar tales técnicas a programas de gran tamaño.

Se ha ideado un método para probar la validez de un conjunto de ecuaciones, denominado *prueba de coherencia*. Utilizando el análisis por casos, se reemplazan las ecuaciones por otras más sencillas que cubran todos los valores posibles de las variables. Esta operación puede hacerse de forma automática mediante el cálculo de los llamados *pares críticos*. El proceso continúa hasta tratar todos los casos, y si a lo largo del mismo no han aparecido contradicciones, las ecuaciones son válidas.

Si se adopta un método de especificaciones constructivas, la prueba de coherencia se reduce a verificar que no se generan ecuaciones entre constructores.

Figura 5 - Ilustración de la unificación ecuacional para $\text{Beh}(q_0, x_1) = q_3$

Regla	Resultado	Asignación
* 9 */	$\text{Beh}(\text{Next}(q_0, a), l) = q_3$	$x_1 \text{ to Add}(a, l)$
* 1 */	$\text{Beh}(q_1, l) = q_3$	$x_1 \text{ to Add}(a_0, l)$
* 9 */	$\text{Beh}(\text{Next}(q_1, a), l) = q_3$	$x_1 \text{ to Add}(a_0, \text{Add}(a, l))$
* 3 */	$\text{Beh}(q_3, l) = q_3$	$x_1 \text{ to Add}(a_0, \text{Add}(a_0, l))$
* 8 */	$q_3 = q_3$	$x_1 \text{ to Add}(a_0, \text{Add}(a_0, \text{Nil}))$

La unificación ecuacional opera de manera similar al Prolog, si bien pueden evitarse ciertos problemas típicos de este lenguaje, tales como la dependencia del orden en que están escritas las cláusulas.

Este proceso de unificación se ilustra en la figura 5. Lo que se pregunta es:

$$\text{Beh}(q_0, x_1) = q_3$$

que expresa el deseo de encontrar las secuencias de acciones x_1 que hacen pasar al autómata del estado q_0 al q_3 . Los números de cada regla de la figura 5 se refieren a los señalados en la figura 3. La columna de "resultados" indica cómo ha cambiado la ecuación por el proceso de unificación, mientras que la columna de "asignación" indica los valores que reciben a lo largo del proceso las variables de la ecuación. La solución que se deduce es:

$$\text{Add}(a_0, \text{Add}(a_0, \text{Nil})).$$

No obstante, pueden obtenerse otras; de hecho, todas las listas de acciones que

Conclusiones

El proceso de especificación y diseño de sistemas de programación se viene considerando como una programación en un lenguaje de muy alto nivel, adoptándose un estilo declarativo que contrasta con los utilizados en lenguajes convencionales y obteniéndose programas bien estructurados en comparación con los que resultan de los lenguajes declarativos actuales (p. ej., Lisp y Prolog). Es importante advertir que el lenguaje de especificación tiene una sólida base teórica. En particular, su semántica operacional dimana de la reescritura de términos, una técnica eficaz que resuelve tanto la satisficibilidad como la validez.

El método de especificación permite expresar la funcionalidad de un sistema. Sin embargo, la concurrencia y diversos aspectos de la ejecución no se pueden tratar explícitamente, necesiándose otras técnicas o combinaciones de técnicas para conseguirlo. Los métodos de especifica-

ción propuestos por ISO (LOTOS) y el CCITT (LED) adoptan para la parte de datos un enfoque similar al descrito en este artículo. El LOTOS y el LED difieren fundamentalmente en el tratamiento de la concurrencia; el LOTOS utiliza álgebras de procesos, y el LED máquinas de estados finitos ampliadas.

Alcatel ha desarrollado herramientas prototipo con las últimas tecnologías para todas las técnicas presentadas en este artículo. El Centro de Investigación de Alcatel Bell ha elaborado un lenguaje de especificación algebraica de segunda generación, ADTS, que cuenta con un compilador de prototipos, y en este momento trabaja en herramientas de prueba. El Centro de Investigación de Alcatel Standard Eléctrica está trabajando en el lenguaje ESTELA y en un entorno que combina especificaciones ecuacionales y clausulares (tipo Prolog). El entorno de apoyo refleja esta división: consiste en una máquina ecuacional y una clausular que operan en estrecha relación. En Laboratoires de Marcoussis se está desarrollando un intérprete eficiente para el lenguaje lógico SLOG, y además se investiga la integración de diferentes métodos y herramientas.

Bibliografía

- 1 N. Dershowitz y D. A. Plaisted: Equational Programming: *Machine Intelligence*, 1987, volumen 11.
- 2 K. Futatsugi, J.A. Goguen, J. Jouannaud y J. Meseguer: Principles of OBJ2: *Proceedings of the Annual Symposium on Principles in Programming Languages*, 1985.
- 3 M. Muñoz, A. Casanova, y J. Cuena: Estela Logic Programming Environment: *Preliminary Report*, 1988.
- 4 L. Duponcheel, J. Heyman y W. Van Puymbroeck: Algebraic Data Type Specifications: Language, Method and Tools: *System Design: Concepts, Method and Tools*, P. Wodon y E. Millgrom (Eds), IEEE Computer Society Press, 1988, págs. 62-70.
- 5 G. Huet y D. Oppen: Equations and Rewrite Rules: A Survey: *Formal Languages: Perspectives and Open Problems*, R. Book (Ed), Academic Press, 1980.
- 6 L. Bachmair, N. Dershowitz y J. Hsiang: Orderings for Equational Proofs: *Symposium on Logic in Computer Science*, Cambridge, 1986, págs. 346-357.
- 7 J. P. Jouannaud y E. Kounalis: Proofs by Induction in Equational Theories Without Constructors: *Symposium on Logic in Computer Science*, Cambridge, 1986, págs. 358-366.

- 8 L. Fribourg: A Strong Restriction of the Inductive Completion Procedure: *Proceedings of the 13th International Conference on Automata, Languages and Programming*, Rennes, 1986.
- 9 L. Duponcheel, L. Jadoul y W. Van Puymbroeck: Proving by Structural Induction in Equational Theories: *Alcatel Bell Internal Report*, n° 884002.
- 10 L. Fribourg: A Narrowing Procedure for Theories with Constructors: *Seventh Conference on Automated Deduction, Lecture Notes in Computer Science 170*, R. Shostack (Ed), 1984, págs. 259-281.
- 11 H. Hussmann: Unification in Conditional-Equational Theories: *Universitat Passau, Internal Report*, 1985, n° 85-02.

Jozef De Man se graduó en ingeniería electrónica en la Universidad de Gante y después entró en el Centro de Investigación de Alcatel Bell (entonces llamada BTM). En 1976, trabajó en el proyecto iAPX 432 en Intel Corp., en Aloha, Oregon. El Sr. De Man es miembro actualmente del comité científico de Alcatel Bell y es jefe del departamento de tecnología de programación avanzada de dicho Centro de Investigación.

Luc Duponcheel obtuvo un MSc en matemáticas en la Universidad de Amberes, y un PhD también en matemáticas de la Universidad de Bruselas en 1980. Entre 1976 y 1986 trabajó como profesor asociado de matemáticas para varias universidades (Nimega, Bruselas y Amberes). En 1984 el Sr. Duponcheel entró en el departamento de tecnologías de programación avanzada del Centro de Investigación de Alcatel Bell, donde trabaja en programación lógica, demostración automática de teoremas y semántica algebraica.

Willy Van Puymbroeck recibió un MSc en física en la Universidad de Amberes en 1977, y un PhD en la misma disciplina y Universidad en 1981. Al año siguiente entró en el departamento de tecnología avanzada de programación del Centro de Investigación de Alcatel Bell. Su interés en el campo de la investigación incluye la programación lógico-funcional, la demostración automática de teoremas y la ingeniería de programación.

Rafael Pérez Domínguez se graduó en 1971 en la Escuela Superior de Ingenieros Electromecánicos de Madrid. Dos años después ingresó en Standard Eléctrica, donde ha trabajado en producción de programas y herramientas de programación para centrales telefónicas por control de programa almacenado, técnicas de población automática para la base de datos interna del Sistema 12, transferencia de herramientas y técnicas de inteligencia artificial, y máquina de producción de datos. El Sr. Pérez Domínguez es un analista del departamento de tecnología de programación avanzada del Centro de Investigación y Desarrollo de Alcatel Standard Eléctrica en Madrid. Desde octubre de 1987 tiene a su cargo el proyecto de investigación Estela para desarrollar un entorno y metodología de programación lógico-funcional.

Programas Ada correctos a partir de especificaciones algebraicas: el proyecto PROSPECTRA de ESPRIT

El proyecto PROSPECTRA está desarrollando una metodología y un sistema soporte integrado para transformar especificaciones algebraicas en programas Ada eficientes de manera progresiva, segura y reutilizable.

P. de la Cruz

A. Pérez Riesco

Alcatel Standard Eléctrica, Madrid, España

Introducción

PROSPECTRA (acrónimo de "desarrollo de PROgramas por eSPECificación y TRAnsformación") es un proyecto multinacional comprendido en el Programa Estratégico Europeo de Investigación y Desarrollo en Tecnología de la Información (ESPRIT). El objetivo del programa es elaborar una metodología y un sistema soporte integrado para transformar paso a paso las especificaciones de requisitos en programas Ada eficientes, de manera segura y reutilizable^{1,2}. Se parte del supuesto de que es inútil intentar comprender, analizar o demostrar la corrección del código detallado adecuado para una ejecución eficaz en máquinas de Von Neumann, y de que el único camino es asegurar, por construcción, que tal código se ajusta a una especificación abstracta "evidentemente correcta".

La metodología PROSPECTRA integra la construcción y verificación durante el desarrollo de los programas. Una especificación inicial de requisitos se va transformando en un programa ejecutable por aplicación sucesiva de reglas cuya corrección se demuestra por una sola vez, con ayuda del sistema, por lo que el programa final es correcto por construcción. El sistema ejecuta las transformaciones bajo la dirección del programador. Se almacenan especificaciones, programas, transformaciones e historias de desarrollos, para formar una base de conocimientos que puedan ser reutilizados.

El sistema PROSPECTRA utiliza intensamente herramientas de proceso de lenguajes (generadores de programas dirigidos por sintaxis) construidas en torno a una representación común de todos los objetos del sistema. Incluye editores interactivos dirigidos por sintaxis para los lenguajes objeto y de transformación, herramientas

de verificación para ayudar a demostrar la corrección y aplicabilidad de transformaciones, así como otras para almacenamiento y búsqueda.

Alcatel Standard Eléctrica participa en este proyecto junto a universidades de Alemania y Gran Bretaña, y compañías privadas de Dinamarca y Francia.

Ciclo de desarrollo

La figura 1 muestra el ciclo de desarrollo en PROSPECTRA. Antes de iniciar el proceso formal, una fase de ingeniería de requisitos establece las exigencias informales del sistema a desarrollar, deduciendo a partir de ella la especificación formal. Estas actividades no forman parte de la metodología PROSPECTRA, si bien PROSPECTRA proporciona un lenguaje adecuado para especificar los requisitos formales de una manera bien estructurada.

Dicha especificación formal de requisitos debe validarse con respecto a la "informal" para asegurar su corrección, generalmente por medio de herramientas-prototipo, tras lo cual se inicia el desarrollo PROSPECTRA. La especificación referida es un conjunto de fórmulas de la lógica ecuacional de primer orden con cuantificación universal ("para todo...") y existencial ("existe algún..."), y en general dista de ser ejecutable, al menos de modo eficaz. A partir de ella se deriva una especificación de diseño, más constructiva, empleando métodos formales o informales. En el último caso, tal especificación debe verificarse para garantizar que equivale a la especificación de requisitos, o que la incluye.

Obtenida ya una especificación de diseño "satisfactoria, la transformación puede comenzar. Cada paso de la misma aplica una regla formalmente definida y capaz de

demonstración (es decir, que preserva la corrección) a una especificación o programa obtenido previamente, produciendo otro semánticamente equivalente. Durante el desarrollo se comprueban las condiciones de aplicabilidad de las reglas, bien de manera automática o bien como obligada certificación (fórmula lógica que el diseñador ha de verificar), de modo que no puedan aplicarse reglas incorrectas. Las reglas de transformación representan decisiones de diseño conscientes que mejoran la eficacia del programa. La especificación de diseño se refina así hasta convertirse en un programa funcional o imperativo. Cuando se alcanza el nivel que proporciona la eficacia exigida al sistema, se detiene la transformación y se utiliza un compilador para generar código máquina ejecutable.

Como la especificación de diseño se ajusta a la de requisitos y cada paso de transformación preserva la corrección de la anterior especificación o programa, el código resultante es forzosamente correcto respecto a la especificación de requisitos

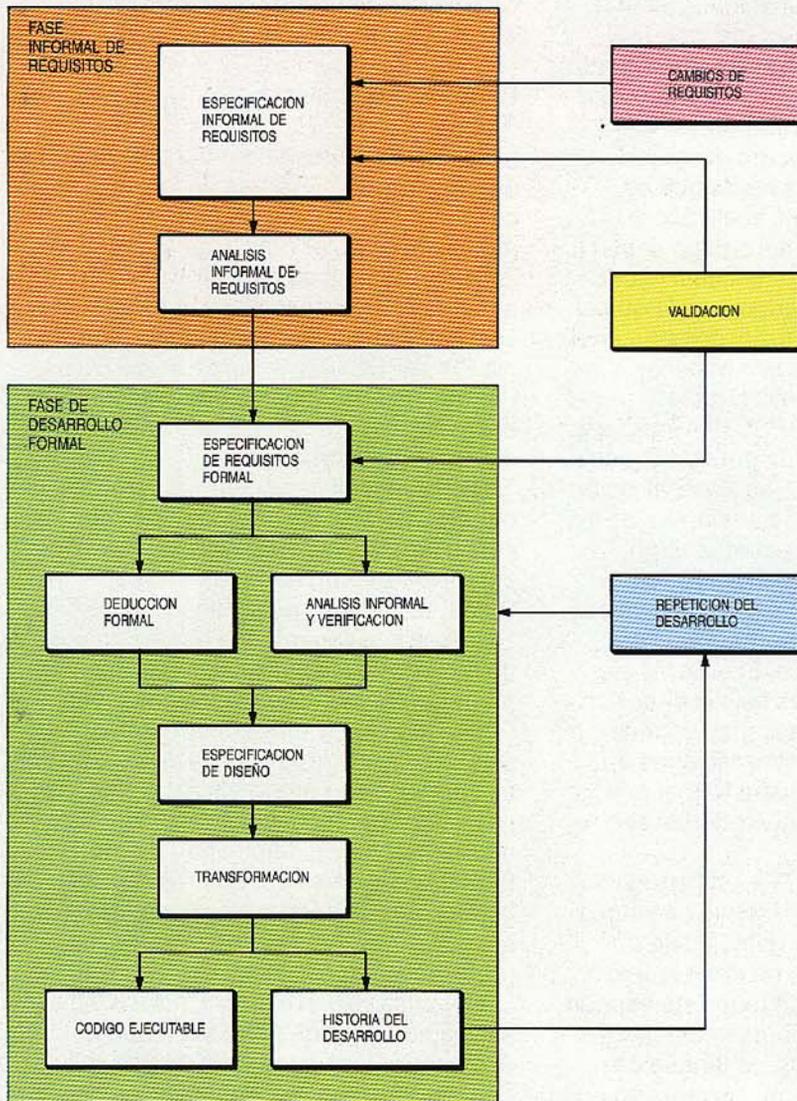
formal. No se necesita depuración ni prueba "a posteriori" (en el sentido tradicional), puesto que dicha prueba se descompone en una secuencia de pequeñas pruebas a lo largo del desarrollo del programa.

Durante el desarrollo, toda deducción, verificación y transformación se registra, obteniendo así una historia del desarrollo que puede utilizarse para repetir éste con una especificación semejante. Si hubiese algún cambio en los requisitos, podría repetirse el desarrollo automáticamente (al menos hasta cierto punto), aprovechando la experiencia de los anteriores.

Es importante hacer siempre los cambios sobre la especificación. Si cambian los requisitos, varía también la especificación correspondiente y hay que desarrollar de nuevo el sistema. Análogamente, si una decisión de diseño resulta desacertada, se puede retroceder hasta el punto en que se tomó y continuar desde ahí el desarrollo. Nunca se "parchea" el código para adaptarlo a nuevos requisitos.

En lo sucesivo, el problema de calcular el máximo común divisor (MCD) de dos números naturales se toma como ejemplo para describir la metodología PROSPECTRA y mostrar el estilo de PANndA (lenguaje de desarrollo PROSPECTRA de amplio espectro) y de TrafoLa, lenguaje para desarrollo de transformaciones de objetos PanndA (especificaciones y programas).

Figura 1
Ciclo de desarrollo
PROSPECTRA.



El lenguaje de desarrollo PANndA

PANndA es un subconjunto de la unión de Ada y Anna. Ada³, un lenguaje de programación imperativo de finalidad general para el desarrollo de sistemas "embebidos", es uno de los más avanzados de ese tipo y se ha convertido en referencia ISO. Incluye potentes medios para definir funciones, datos y procesos y comunicación entre ellos, así como un ingenioso mecanismo de tratamiento de excepciones. Anna⁴ se desarrolló para anotar programas Ada y ayudar a comprenderlos y verificarlos.

PANndA cubre toda la gama, desde especificaciones de requisitos inconcretas hasta versiones aplicativas e imperativas. PANndA-S, sublenguaje orientado a especificaciones, abarca desde las inconcretas hasta las algorítmicas, y es el único lenguaje que el programador puede editar directamente en el sistema. El resto de PANndA se obtiene únicamente mediante transformaciones.

En PANndA-S se incluyen construcciones para:

- especificación: ecuaciones condicionales recurrentes, tipos y subtipos defini-

dos algebraicamente, funciones parciales y de orden superior

- modularización: paquetes y paquetes genéricos
- concurrencia: funciones no estrictas (definidas aunque sus argumentos no lo estén), tareas
- reutilización: paquetes genéricos, sobrecarga de nombres
- tratamiento de errores: excepciones
- versión imperativa: asignaciones, procedimientos (procedures), bucles interactivos.

A pesar de la herencia sintáctica y conceptual, el fundamento de PANndA difiere bastante de Ada/Anna. La semántica de un programa Ada anotado viene totalmente determinada por el programa, mientras que las anotaciones son aserciones redundantes del significado pretendido que ayudan a verificar dicha semántica. Sin embargo, las anotaciones pueden contradecir al programa; la verificación se dirige a demostrar que no existe contradicción alguna.

El significado de un programa PANndA⁵ viene dado por todo su texto, con independencia del nivel de cualquiera de sus partes. Una parte puede estar al nivel de especificación de requisitos y otra a un nivel imperativo, contribuyendo todas ellas a la semántica global del programa. No obstante, sólo hay una expresión para un significado dado, por lo que no puede haber contradicciones.

Especificaciones (inconcretas) de requisitos

La figura 2 muestra una especificación informal sencilla del MCD de dos números naturales, y la figura 3 expone la correspondiente especificación formal de requisitos, escrita en PANndA-S, que es el punto de partida para el desarrollo formal.

Cada especificación en PANndA-S consiste en un único paquete semejante a los de Ada y puede contener uno o más tipos y/o funciones. En este caso, la especificación consiste en un paquete llamado GREATEST_COMMON_DIVISOR (máximo común divisor) que incluye dos funciones a realizar sobre el tipo (predefinido) de los números naturales. Una de ellas, GCD, es la que calcula el máximo común divisor. La otra, precedida por el símbolo "—:", es una función auxiliar; aunque forma parte de la especificación, no es visible fuera del paquete y no precisa ser transformada en un programa ejecutable.

"El máximo común divisor de dos números naturales, X e Y, ambos mayores que cero, es otro número natural, Z, que los divide a ambos y es tal que no existe ningún otro número mayor que Z que sea divisor de X e Y".

"Un número natural X, mayor que cero, divide a otro número natural Y, si existe un número natural K tal que K multiplicado por X da Y como producto".

Figura 2
GCD: especificación informal.

```
package GREATEST_COMMON_DIVISOR is
  function GCD (X,Y: NATURAL) return NATURAL;
  where X>0, Y>0,
  return N:NATURAL =>
    DIVIDES (N,X) and
    DIVIDES (N,Y) and
    not (exist M:NATURAL =>
      M>N and
      DIVIDES (M,X) and
      DIVIDES (M,Y) );
  --: function DIVIDES (N,X: NATURAL) return BOOLEAN;
  where N>0,
  return (exist K:NATURAL => K * N = X) ;
end GREATEST_COMMON_DIVISOR;
```

Figura 3
GCD: especificación formal de requisitos en PANndA-S.

La cláusula "where" bajo el encabezamiento de función establece las condiciones en las que puede aplicarse. El resultado de la función está definido solamente en el caso de que los argumentos cumplan dichas condiciones.

En este ejemplo ambas funciones se han especificado predicativamente, es decir, sus resultados se especifican (en la cláusula "return") mediante un predicado en lógica de primer orden (posiblemente con cuantificadores) sobre los argumentos de la función, lo cual resulta especialmente adecuado para especificaciones iniciales de requisitos. Como alternativa, las funciones y tipos de datos pueden especificarse de modo axiomático mediante un conjunto de fórmulas lógicas de primer orden que podrían estar cuantificadas (axiomas).

Se dice que la semántica de una especificación es inconcreta cuando puede constar de varios modelos diferentes (no isomorfos). La inconcreción es un potente mecanismo para diferir decisiones manteniendo el rigor y el formalismo durante todo el proceso de diseño.

Hay una gran diferencia entre inconcreción e indeterminismo. Una especificación inconcreta de una función tiene un conjunto de funciones diferentes como modelos potenciales; cada función da un resultado único, siempre el mismo, para unos argumentos dados, y las decisiones de diseño futuras afectan a la elección de una de tales funciones. Por el contrario, una función indeterminista devuelve, para unos argumentos dados, un resultado impredecible (distinto según las invocaciones) entre un

conjunto de posibles valores. No se necesita este concepto en PANndA-S, pues la inconcreción es suficiente incluso para modelar concurrencia.

De las especificaciones de requisitos a las de diseño (constructivas)

La transformación comienza con la especificación de diseño. Esta puede obtenerse deduciendo formalmente axiomas nuevos a partir de los ya existentes en la especificación de requisitos (por ejemplo, mediante el procedimiento de completación de Knuth-Bendix), añadiendo nuevos axiomas y demostrando su coherencia con los originales, o escribiendo directamente una especificación más constructiva y comprobando que es equivalente a la especificación de requisitos original o que la implica.

La figura 4 muestra una especificación constructiva en PANndA-S del paquete GREATEST_COMMON_DIVISOR, según el algoritmo de Euclides. Nótese que se ha omitido la función auxiliar DIVIDES, ya innecesaria.

Las especificaciones de diseño son típicamente axiomáticas; los axiomas son un conjunto de ecuaciones condicionales recurrentes cuantificadas universalmente. Esta clase de especificaciones se pueden interpretar o ejecutar directamente por reescritura, supuesto que ésta sea completa y la ejecución termine. Podrían así servir como prototipo para validar la especificación frente a los requisitos informales.

Desde un enfoque de programación lógica, el proceso de desarrollo podría terminar aquí. No obstante, la eficiencia obtenida podría ser insuficiente para el problema en cuestión. La metodología PROSPECTRA permite transformar el programa todavía más, de modo que pueda ser computado en máquinas más convencionales, como las representadas por los estilos de programación funcional (máquinas de reducción) o imperativo (máquinas de Von Neumann).

El desarrollo por transformación puede verse como un proceso de "compilación" desde el nivel lógico al aplicativo (funcional) o imperativo, de un modo que el programador puede adaptar al problema específico (en contraposición a la convencional compilación "monolítica" desde un lenguaje imperativo de alto nivel a código máquina). Queda abierta la cuestión de si merece la pena tal "compilación a la medida". El mejor compromiso, propuesto por PROSPECTRA, es un procedimiento intermedio basado en una biblioteca de transformaciones orientadas a cada tipo de problema.

```

package GREATEST_COMMON_DIVISOR is
  function GCD (X,Y: NATURAL) return NATURAL;
  where X>0, Y>0;

  axiom for all X,Y: NATURAL =>
    GCD (X,X) = X,
    X>Y -> GCD (X,Y) = GCD (X - Y, Y),
    Y>X -> GCD (X,Y) = GCD (X, Y - X);

end GREATEST_COMMON_DIVISOR;
    
```

Figura 4
GCD: especificación de diseño.

De las especificaciones (constructivas) a los programas (aplicativos)

El siguiente paso es transformar la especificación de diseño en una especificación algorítmica⁶ que pueda ser traducida a un programa aplicativo. El principal objetivo de la transformación en especificaciones algorítmicas es eliminar la necesidad de unificación de patrones, sustituyéndola por análisis explícito de casos, selección de componentes y comprobaciones de igualdad. La figura 5 muestra una especificación algorítmica del paquete GREATEST_COMMON_DIVISOR.

El nivel de especificaciones algorítmicas es el más bajo (es decir, el más detallado o constructivo) al que puede llegarse sin abandonar PANndA-S. Asimismo, es el nivel más bajo editable directamente por el programador. Sólo puede añadirse mayor detalle mediante transformaciones.

Para obtener un programa aplicativo a partir de una especificación algorítmica, solamente hay que sustituir las ecuaciones

```

package GREATEST_COMMON_DIVISOR is
  function GCD (X,Y: NATURAL) return NATURAL;
  where X>0, Y>0;

  axiom for all X,Y: NATURAL =>
    X=Y -> GCD (X,Y) = X,
    X>Y -> GCD (X,Y) = GCD (X-Y, Y),
    Y>X -> GCD (X,Y) = GCD (X, Y-X);

end GREATEST_COMMON_DIVISOR;
    
```

Figura 5
GCD: especificación algorítmica.

condicionales por ecuaciones incondicionales que contengan expresiones condicionales (*if-then-else-end-if*). Este paso es sencillo, siempre que los antecedentes de las ecuaciones condicionales cubran todos los posibles casos en que la correspondiente función es aplicable (si hay solapamientos, los resultados deben ser iguales). Así sucede en la especificación algorítmica de la figura 5, transformable directamente en el programa aplicativo de la figura 6.

El lenguaje de transformaciones TrafoLa-S

TrafoLa-S es el lenguaje para especificar transformaciones de PROSPECTRA⁷. Es una extensión de PANndA-S⁸, que considera la sintaxis de PANndA como un tipo de datos predefinido en el lenguaje. La idea básica es utilizar esencialmente el mismo lenguaje, PANndA-S, para especificar los objetos en desarrollo y los desarrollos (transformaciones) sobre dichos objetos.

La idea de base en TrafoLa-S es que los árboles sintácticos abstractos que representan especificaciones o programas en PANndA pueden considerarse valores de un tipo de datos abstractos. Los símbolos no terminales de la gramática de PANndA (identificador, expresión, paquetes, etc.) corresponden a clases de objetos del tipo de datos, y para cada regla de producción de la gramática PANndA hay una función constructora en el tipo de datos abstractos. Por ello, PANndA-S puede también utilizarse como lenguaje de transformaciones, aunque especificar transformaciones expresadas en los constructores de la gramática abstracta de un lenguaje (la llamada forma canónica o abstracta) es bastante embarazoso, haciendo muy extensa y prácticamente incomprendible la especificación de cualquier transformación interesante. Por esta razón, PANndA-S se ha ampliado para admitir "frases PANndA", escritas en su sintaxis concreta (es decir, en forma textual), como un tipo particular de expresión. El resultado es el lenguaje de transformación TrafoLa-S. La figura 7 muestra una transformación sencilla que permite apreciar el aspecto de TrafoLa-S.

Desarrollo al nivel aplicativo

Las principales vías para mejorar la eficacia de un programa sin abandonar el nivel aplicativo son la supresión de cálculos repetidos, la sustitución de formas complejas de recurrencia (en cascada o anidada) por la recurrencia lineal o final, y la realización de los tipos de datos abstractos en términos de tipos concretos del lenguaje. En otro lugar⁹ pueden hallarse muchas transformaciones útiles a nivel aplicativo.

En el ejemplo considerado no existen tipos de datos abstractos (sólo el tipo predefinido NATURAL), y la función GCD es ya recurrente final. Aunque hay dos llamadas recurrentes a GCD en el cuerpo de la función, sólo una de ellas se ejecuta realmente puesto que se encuentran en ramas exclusivas de una expresión condicional. La recurrencia final es evidente en la función equivalente mostrada en la figura 8.

```
package GREATEST_COMMON_DIVISOR is
  function GCD (X,Y: NATURAL) return NATURAL;
  where X>0, Y>0,
  return
    if X=Y then X
    elsif X>Y then GCD (X-Y, Y)
    else GCD (X, Y-X)
    end if ;
end GREATEST_COMMON_DIVISOR;
```

Figura 6
GCD: programa aplicativo.

De los programas aplicativos a los imperativos

A menudo es insuficiente la mejora de eficacia obtenida al desarrollar los programas al nivel aplicativo, en cuyo caso el programa aplicativo puede transformarse en otro imperativo, y continuar el desarrollo

```
package TRANSFORMATION is
  function If_Merge (X: Statement List)
    return Statement List;
  where Structured (X);
  axiom for all M, N, P, Q:Statement;
  C:Expression =>
    If_Merge (
      [ if C then M else N end if;
        if C then P else Q end if; ]) =
      [ if C then M ; P
        else N ; Q
        end if ; ];
end TRANSFORMATION;
```

Figura 7
Especificación de una transformación.

transformacional a este último nivel. La principal manera de transformar un programa aplicativo en imperativo es eliminar la recurrencia (sustituyendo la recursión final por bucles iterativos), sustituir las expresiones condicionales por sentencias condicionales e introducir sentencias de asignación y variables. Ya en el nivel imperativo, puede mejorarse la eficacia por introducción de procedimientos (sustituyendo la asignación a variables del resultado de

```
package GREATEST_COMMON_DIVISOR is
  function GCD (X,Y: NATURAL) return NATURAL;
  where X>0, Y>0,
  return
    if X=Y then X
    else GCD (if X>Y then X-Y
              else X
              end if;
              if X>Y then Y
              else Y-X
              end if)
    end if ;
end GREATEST_COMMON_DIVISOR;
```

Figura 8
GCD: programa aplicativo mejorado (recurrencia final explícita).

las llamadas a funciones por llamadas a procedimientos), fusión de bucles y sentencias condicionales, etcétera.

La figura 9 muestra un programa imperativo para calcular el máximo común divisor.

Desarrollo de transformaciones

Las transformaciones, que no son sino funciones aplicadas a especificaciones y programas (unas y otros susceptibles de expresión en PANndA-S) pueden desarrollarse utilizando el mismo paradigma transformacional que para otros tipos de programas. Una transformación puede especificarse en TrafoLa-S – PANndA-S ampliado para manejar objetos expresados en PANndA – y desarrollarse hasta tener una forma ejecutable. En este proceso pueden reutilizarse componentes y desarrollos preexistentes.

Repetición de desarrollos

Durante el desarrollo transformacional, el sistema registra automáticamente toda operación de modo que, al final del desarrollo, se tiene una historia completa que puede considerarse como un meta-programa capaz de producir un programa a partir de una especificación. Esta historia de desarrollo puede utilizarse para obtener diferentes programas a partir de distintas especificaciones, siempre que las etapas individuales de desarrollo sean aplicables. Esto da una base para repetir y reutilizar desarrollos cuando una especificación cambia o la nueva especificación inicial exhibe propiedades similares.

Los desarrollos pueden asimismo combinarse para producir otros más complejos, lo que conduce a un "álgebra de los desarrollos", similar en muchos aspectos a la de los datos o los programas⁹. Es posible especificar objetivos de desarrollo y realizarlos utilizando las transformaciones disponibles; partiendo de ahí se puede constituir una base de conocimientos sobre desarrollo de programas, estrategias de desarrollo, etc.

Dentro de esta óptica, toda operación en el sistema puede verse como transformación de algún tipo de "programa". De hecho, el lenguaje de control del sistema, ControLa, no es más que un subconjunto ejecutable de TrafoLa. Esto conduce a un tratamiento uniforme del lenguaje de programación, el lenguaje de transformaciones y el lenguaje de órdenes.

Reutilización en PROSPECTRA

Todos los objetos formales producidos durante el desarrollo de un programa se almacenan en la biblioteca central del sistema PROSPECTRA, incluyendo especificaciones, programas, transformaciones y desarrollos. La disponibilidad de estos objetos, junto con los mecanismos de composición comunes a PANndA y TrafoLa, ofrece buenas oportunidades para su reutilización.

```

package body GREATEST_COMMON_DIVISOR is
  function GCD (X,Y: NATURAL) return NATURAL is
    VX: NATURAL := X;
    VY: NATURAL := Y;
  begin
    while VX=VY loop
      if VX>VY then VX := VX-VY;
      else VY := VY-VX;
      end if;
    end loop;
    return VX;
  end GCD;
end GREATEST_COMMON_DIVISOR;
    
```

Figura 9
GCD: programa imperativo.

Al nivel del producto, las (sub)especificaciones y (sub)programas pueden reutilizarse como partes de especificaciones y programas más complejos, según el sentido convencional de reutilización de (sub)productos. Además, las especificaciones y programas genéricos pueden instanciarse y por tanto reutilizarse para aplicaciones diferentes.

Al nivel de proceso, las transformaciones pueden reutilizarse como componentes para especificar o realizar transformaciones o desarrollos más complejos. El mismo subproceso puede utilizarse en procesos diferentes. También pueden aplicarse transformaciones y desarrollos a diferentes especificaciones o programas de entrada. Además, algunos pueden utilizarse para desarrollar tanto programas como transformaciones (en general, todas aquellas transformaciones que sean independientes de los tipos de datos empleados).

El empleo del mismo lenguaje a ambos niveles hace aún más evidentes los aspectos comunes al desarrollo de objetos y procesos.

El sistema PROSPECTRA

El PROSPECTRA se centra en torno al concepto de árbol sintáctico abstracto (ASA) atribuido y operaciones sobre tales árboles. Prácticamente toda actividad en el sistema puede considerarse como una transformación de un ASA, y casi todas las

herramientas del sistema producen, modifican o almacenan ASA.

Dichas herramientas se clasifican según su utilización principal:

- *Herramientas de generación del sistema*, que son el generador de editores y el generador de transformadores. Por el momento, para ambas se utiliza el generador de sintetizadores de la Universidad de Cornell (Cornell Synthesizer Generator, CSG)¹⁰. Todas las demás herramientas del sistema son, bien generadas por el CSG o bien desarrolladas por otros medios, pero controladas desde una "envoltura" CSG.
- *Herramientas de desarrollo de programas*, a saber, el editor de PANndA-S¹¹, el transformador o transformadores de PANndA y el intérprete de TrafoLa-H¹². Tanto el editor como los transformadores se generan por el CSG.
- *Herramientas de desarrollo de transformaciones*, es decir, el editor de TrafoLa-S⁷, los transformadores de TrafoLa-S y los traductores de TrafoLa-S a SSL (el lenguaje de entrada al CSG) y a TrafoLa-H, todos ellos generados con el CSG.
- *Herramientas de verificación*, que son el verificador¹³ y el sistema de completación de ecuaciones condicionales (CEC)⁷, utilizados tanto en el desarrollo de programas como en el de transformaciones. El CEC proporciona reescritura condicional, y puede por tanto utilizarse para obtener prototipos. El verificador se genera con el CSG.

- *Herramientas de control y soporte*, que incluyen el editor de ControLa, el intérprete de ControLa (controlador), el gestor de la biblioteca¹⁴ y el banco de métodos. Además de realizar el registro y repetición de los desarrollos, el controlador gobierna las demás herramientas y ofrece un interfaz uniforme al usuario de las mismas. El gestor de biblioteca, implantado mediante el entorno europeo normalizado de herramientas comunes portables, se encarga de almacenar y extraer todos los objetos que maneja el sistema. Merced al banco de métodos se pueden realizar búsquedas inteligentes en la biblioteca. El CSG genera el editor de ControLa y el interfaz del gestor de biblioteca.

La figura 10 muestra un diagrama general del sistema.

Conclusiones

Los lenguajes de PROSPECTRA, PANndA y TrafoLa, incorporan eficaces conceptos que permiten afrontar problemas reales de ingeniería de programación. La metodología y el sistema PROSPECTRA requieren un sólido conocimiento de los métodos formales y han sido concebidos para sustentar un método de programación complejo e inteligente (resolución de problemas y diseño de algoritmos). Ofrecen también un medio para acumular conocimientos útiles sobre programación, formalmente expresados como transformaciones y métodos de transformación. Este conocimiento, tras la natural selección impuesta por la experiencia, probablemente hará disminuir la necesidad

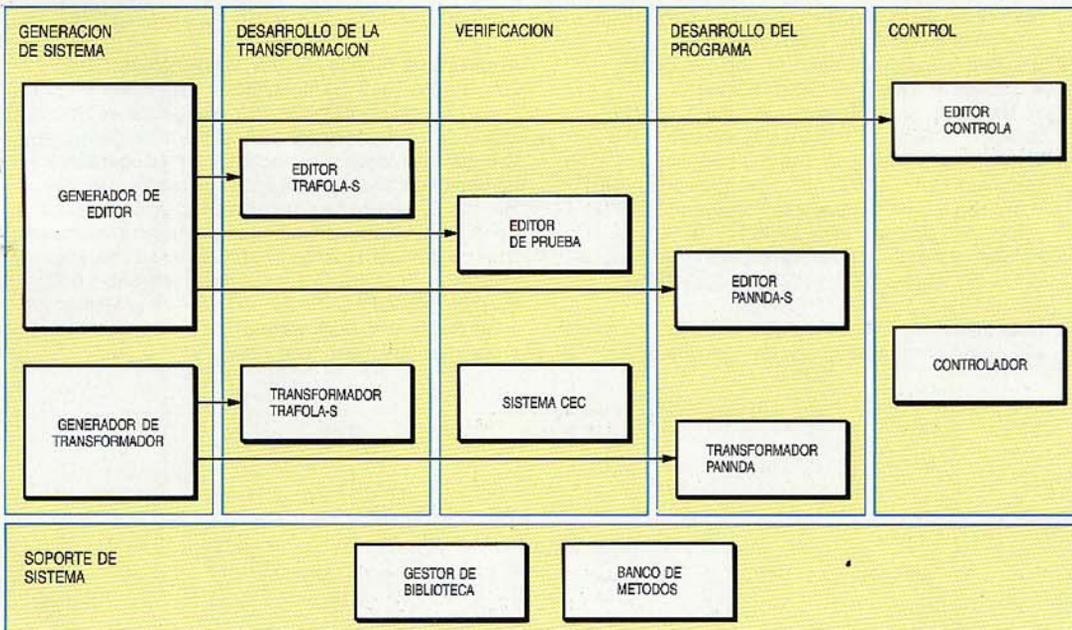


Figura 10
Arquitectura del sistema PROSPECTRA.

de cualificación de los usuarios, pero aún así seguirá siendo elevada.

Los recursos de computación y la calidad del personal implicado serán mayores que los actuales. Sin embargo, los resultados esperados son de otra índole: programas con garantía de corrección y exentos de errores. Esto es particularmente importante en el desarrollo de grandes sistemas para los cuales la fiabilidad es esencial.

Los beneficios de la utilización de PROSPECTRA no se percibirán durante el proceso de desarrollo, sino después, al tener una explotación sin fallos y unos desarrollos altamente reutilizables.

El proyecto incluye una aplicación experimental, y ya se han obtenido resultados prometedores aunque limitados. Se necesita realizar muchas más aplicaciones, tanto experimentales como reales, para evaluar la metodología y el sistema en la práctica y de ahí obtener componentes y desarrollos útiles y reutilizables. Se dispone ya de un prototipo experimental del sistema con fines de evaluación, y se tendrá un prototipo final hacia finales de 1989.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a todas aquellas personas participantes en el proyecto que han ayudado a corregir y mejorar este artículo, y especialmente al profesor B. Krieg-Brückner.

Referencias

- 1 B. Krieg-Brückner, H. Ganzinger, M. Broy, R. Wilhelm, U. Moncke, B. Weisgerber, A. McGettrick, I. Campbell y G. Winterstein: PROgram Development by SPECification and TRAnsformation in Ada/Anna: En P. Wallis, editor, *Ada: Managing the Transition*, páginas 249-258, *Ada Europe Conference 86*, Ada Companion Series - Cambridge University Press, mayo 1986.
- 2 F. L. Bauer, R. Berghammer, M. Broy, W. Dösch, F. Geiselbrechtinger, R. Gnatz, E. Hangel, W. Hesse, B. Krieg-Brückner, A. Laut, T. Matzner, B. Möller, F. Nickl, H. Patsch y H. Wössner: The Munich Project CIP, Vol I: The Wide Spectrum Language CIP-L, LNCS 183, Springer Verlag, 1985. Vol II: The Program Transformation System CIP-S, LNCS 292, Springer Verlag, 1987.
- 3 Reference manual for the Ada programming language: ANSI, febrero 1983, ANSI/MIL-STD-1815A-1983.
- 4 D. C. Luckham, F. W. von Henke, B. Krieg-Brückner y O. Owe: Anna, a Language for Annotating Ada

Programs: *Preliminary Reference Manual*, Technical Report N° 84-248, Computer Systems Laboratory, Stanford University, junio 1984.

- 5 M. Breu, M. Broy, T. Grünler y F. Nickl: PANndA-S Semantics; *PROSPECTRA Study Note M.2.1.S1-SN-1.3*, Universität Passau, abril 1988
- 6 S. Kahrs: From Constructive Specifications to Algorithmic Specifications: *PROSPECTRA Study Note M.3.1.S1-SN-1.2*, Universität Bremen, noviembre 1986.
- 7 P. de la Cruz: The TrafoLa-S Editor (Version 3.0): *PROSPECTRA Study Note S.2.1.C1-SN-1.1*, Alcatel Standard Eléctrica, mayo 1988.
- 8 N. Botta, J. Jörgensen y E. W. Karlsen: Abstract Syntax of PANndA: *PROSPECTRA Study Note S.3.2.S2-SN-1.2*, Dansk Datamatik Center, abril 1988.
- 9 B. Krieg-Brückner: Algebraic Formalization of Program Development by Transformation: *PROSPECTRA Report M.1.1.A3-R-30.1*, Universität Bremen, febrero 1988.
- 10 T. Reps y T. Teitelbaum: The Synthesizer Generator: *Reference Manual: Department of Computer Science*, Cornell University, 1987.
- 11 C. B. Nielsen, N. Botta y E. W. Karlsen: The PANndA-S Editor and Front End: Rationals: *PROSPECTRA Study Note S.3.1.C1-SN-6.0*, Dansk Datamatik Center, noviembre 1987; Specifications: *PROSPECTRA Study Note S.3.1.C1-SN-6.0*.
- 12 R. Heckmann: Notes on TrafoLa, V. Syntax and Semantics of TrafoLa: *PROSPECTRA Study Note S.1.6-SN-10.0*, Universität Saarland, octubre 1987.
- 13 X. Chen and O. Traynor: A Proof Editor for PANndA-S Theories: *PROSPECTRA Report S.3.4-R-7.0*, University of Strathclyde, abril 1988.
- 14 B. Mathae: The Library Manager Specifications: *PROSPECTRA Study Note S.4.4-ESD-2.1*, SYSECA Logiciel, noviembre 1987.

Pedro de la Cruz nació en San Sebastián, España, en 1958. Estudió en la Universidad Politécnica de Madrid, obteniendo el título de ingeniero de telecomunicación en 1982. De 1982 a 1984 trabajó como ayudante de investigación en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación de Madrid, colaborando en proyectos sobre bases de datos y sistemas concurrentes. De 1984 a 1987 trabajó como profesor colaborador en dicha escuela, y además fue miembro del 11º grupo de trabajo COST sobre aspectos de distribución en sistemas de información (DAISY) como experto de la CCE. En 1987 el Sr. de la Cruz entró en Alcatel Standard Eléctrica para colaborar en el proyecto PROSPECTRA, dirigiendo actualmente el equipo que lo desarrolla.

Angel Pérez Riesco nació en Bercianos de Vidriales (España) en 1949. Es ingeniero industrial desde 1971. En 1972 entró en el Centro de Investigación de Standard Eléctrica, donde colaboró en desarrollar programas de CAE para centrales telefónicas, sistemas operativos y herramientas de CAE para sistemas telefónicos, herramientas de prueba de programas secuenciales y concurrentes, y en introducir métodos de diseño basados en tipos de datos abstractos y herramientas de prueba asociadas. El Sr. Pérez Riesco fue responsable del proyecto PROSPECTRA en el Centro de Investigación antes de hacerse responsable de investigación en programación en enero de 1988.

Tecnologías de inteligencia artificial para aplicaciones en tiempo real y orientadas a objetos

Pese al gran progreso de la tecnología de sistemas expertos en los diez últimos años, la mayoría de envolturas de sistemas expertos no han podido tratar problemas críticos en tiempo ni aquéllos cuyo enfoque se orienta al objeto. Para superar estas limitaciones se han desarrollado dos nuevos lenguajes: PAMELA, adecuado para aplicaciones en tiempo real, y LORE, capaz de acometer problemas con características orientadas al objeto.

F. Barachini

Alcatel Austria, Centro de Investigación
ELIN, Viena

Ch. Benoit

Laboratoires de Marcoussis, Marcoussis,
Francia

Introducción

Pocas son las aplicaciones actuales en que no convenga utilizar sistemas expertos para aprovechar el conocimiento existente. Existe una serie de herramientas para construir sistemas expertos, cada una de ellas dotada de medios diferentes para tratar tipos específicos de problemas. Por lo tanto, mientras no aparezca un "solucionador" de problemas genérico, el usuario deberá seguir escogiendo una herramienta que se ajuste a la aplicación para la cual se concibe el sistema experto. Alcatel ha desarrollado dos lenguajes de inteligencia artificial: PAMELA, para utilización en tiempo real, y LORE, capaz de manejar problemas que implican aspectos orientados a objetos.

PAMELA

Aunque la tecnología de sistemas expertos haya avanzado espectacularmente en la última década, relativamente pocos casos han tenido implicaciones críticas en tiempo debido a sus grandes exigencias de computación. Una aplicación de particular interés es la de controlar sistemas de conmutación de telecomunicaciones¹. Ahora, el lenguaje de programación de inteligencia artificial PAMELA², basado en reglas, incorpora unos conceptos que le hacen adecuado para construir sistemas expertos en tiempo real utilizables como parte integrante de un elemento de control de sistema.

Integración fácil

Si bien muchos problemas requieren métodos de programación a la vez basados en procedimientos y en reglas (declarativos), normalmente hay que escoger entre unos u otros. Combinar los sistemas expertos con aplicaciones por procedimientos de alto nivel crea grandes problemas debido a los interfaces que han de definirse entre los dos métodos. Por ello, la comunicación entre un sistema experto y cualquier otro programa suele apoyarse en llamadas a procedimientos. Dado que estos cuerpos de procedimiento normalmente se escriben en lenguaje diferente al del sistema experto, el usuario no puede explotar todas las posibilidades del lenguaje llamado desde el sistema experto, y a la inversa. Para superar esta limitación, el trabajo en Alcatel Austria se ha enfocado a combinar el CHILL, lenguaje de alto nivel definido por el CCITT, con construcciones declarativas.

PAMELA es un lenguaje declarativo que puede ser totalmente integrado en un entorno CHILL, permitiendo utilizar todas las posibilidades del CHILL (después C y ADA) sin apoyarse en llamadas a procedimientos. Por lo tanto el programador no está obligado a aprender un lenguaje enteramente nuevo.

El estilo declarativo de los programas orientados a reglas es especialmente útil cuando el orden de ejecución de las subrutinas es no determinista, ya que entonces se puede desarrollar el programa introduciendo reglas sin atender al orden en que

Figura 1
Regla PAMELA.

```

Switch_rule: RULE;
P1 (current_situation = timeout_detected;
    board_number = 4711)
==>
switch_to_redundant(P1.board_number + X);
    
```

vayan a ejecutarse. Tal orden, por el contrario, lo determina una máquina de inferencia. Además, a menudo es imposible obtener un algoritmo específico para problemas de naturaleza general (control en-línea de sistemas de conmutación o diagnóstico de fallos), por lo cual suele ser útil describir la solución expresándola en reglas en vez de hacerlo de modo explícito, como en los lenguajes convencionales.

Las reglas PAMELA constan de "parte-SI (IF)" y "parte-ENTONCES (THEN)", denominadas lado izquierdo y lado derecho, respectivamente. El lado izquierdo comprende una serie de condiciones, llamadas patrones, que deben cumplirse para que puedan ejecutarse la secuencia de acciones descritas en el lado derecho. Los patrones están contruidos como expresiones CHILL (posteriormente C y ADA) mientras que el lado derecho contiene puras sentencias CHILL (luego C y ADA). Por lo tanto, toda regla adopta la forma siguiente:

lado izquierdo → lado derecho

Figura 2
Concepto de modularización.

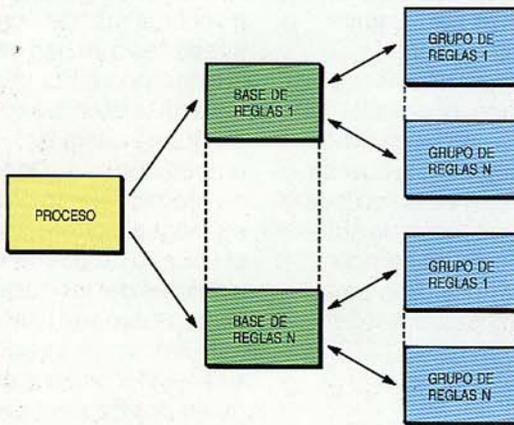
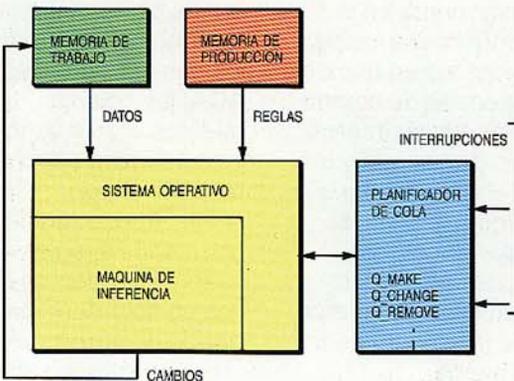


Figura 3
Arquitectura de un sistema experto PAMELA.



La regla muy simplificada que se muestra en la figura 1 conmuta a una unidad en reserva activa (hot standby) en el caso de problemas de configuración. La regla se activa cuando se detecta una temporización en la placa 4711. En la rutina "conmutar-al-redundante (switch-to-redundant)", puede activarse una unidad en reserva activa identificada por la expresión "número de placa + X (board-number + X)" y reiniciarse la placa 4711. Este ejemplo muestra la sencillez de construcción de las reglas PAMELA. Otra ventaja es que, al trabajar el programador en un entorno de programación familiar, el desarrollo del sistema experto avanza con rapidez.

El compilador PAMELA actúa como un precompilador que genera código en el lenguaje de alto nivel utilizado en el lado derecho de la regla. Se necesitan, pues, dos etapas de compilación para generar código objeto.

El concepto de base de reglas

En PAMELA las reglas pueden estructurarse y dividirse en grupos diferentes, figurando en el mismo grupo las reglas que contribuyen a solucionar un determinado problema.

Las reglas son accionadas por hechos, representados por estructuras internas, cada uno con su tipo específico: por ejemplo, el conmutador se representa por dos estados (on, off) y un número dado. Estas declaraciones de tipo para los hechos utilizados en las reglas se dan en un módulo de definiciones, y por tanto la realización y la definición están claramente separadas. Una colección de grupos de reglas con sus definiciones de tipo asociadas constituye una base de reglas (Fig. 2). Mediante sentencias específicas PAMELA un grupo de reglas está ligado con una base de reglas en tiempo de compilación, permitiendo al programador decidir a qué base pertenece ese grupo. Un proceso puede llamar a distintas bases de reglas para resolver problemas diferentes. Los grupos de reglas que pertenecen a bases distintas pueden comunicarse por mensajes, acceso a bases de datos o llamadas al sistema operativo en el lado derecho de las reglas.

Atención a problemas en tiempo real

Un completo estudio de muchos lenguajes y herramientas de inteligencia artificial demostró que la mayoría eran incapaces de tratar con eficacia problemas críticos en tiempo. Además, aunque se hayan obtenido varios otros algoritmos de inferencia^{3,4,5}, la mayoría de los lenguajes declarativos utilizan para este fin el algoritmo RETE⁶ y por ello el trabajo se ha concentrado sobre todo en optimizar este algoritmo en tiempo de ejecución.

Típicamente un sistema de producción consta de tres bloques principales (Fig. 3): la memoria de producción (memoria de largo plazo) donde se almacenan las reglas, la memoria de trabajo (de corto plazo) para almacenar los hechos, y la máquina de inferencia que controla la ejecución de las reglas en el ciclo reconocimiento-acción. Este ciclo comprende a su vez tres fases: la fase de concordancia que evalúa los lados izquierdos de las reglas para determinar cuáles son válidas, la de selección que elige entre las reglas válidas la que ha de ejecutarse, y la de ejecución que realiza las acciones de esa regla.

Se ha comprobado por mediciones que la fase de concordancia es la que más tiempo consume en un sistema experto, por lo que su optimización ha concentrado los esfuerzos. En esencia, las reglas se representan internamente como una estructura de datos denominada red RETE, en la que el compilador PAMELA logra un tiempo de ejecución óptimo.

Tabla 1 – Tiempos de ejecución medidos en PAMELA y OPS83

	PAMELA	OPS83	reglas disparadas
MAB-NASA	0,38	0,72	81
EMAB	28,67	869,5	903
COMBI	41,50	1346,0	1387
RUBIK	113,83	129,5	342
TOURNEY	80,90	**	543

** No pudieron hacerse medidas por desbordamiento de memoria

La tabla 1 muestra las mediciones de tiempo de ejecución con PAMELA en un PC/AT de IBM, y su comparación con OPS83, hoy día el lenguaje de sistema experto más rápido en monoprocesador. Para obtener una extensa gama de marcos de referencia de sistemas expertos, se seleccionaron las aplicaciones siguientes:

MAB, el "sistema experto del mono y las bananas" de la NASA, que contiene 29 reglas.

EMAB, versión ampliada del "mono y bananas" tiene el mismo número de reglas, pero las reglas se disparan (ejecutan) más frecuentemente ya que más monos tratan de alcanzar las bananas.

COMBI, que evalúa todas las posibles combinaciones de términos de una suma, que sumadas dan un valor escogido interactivamente. Comprende seis reglas.

RUBIK, un programa que contiene 69 reglas para resolver el cubo de RUBIK.

TOURNEY, un programa compuesto de 19 reglas para planificar los encuentros en un torneo.

La última columna en la tabla 1 muestra el número de reglas que se han ejecutado. La comparación de resultados desmiente la crítica de la excesiva lentitud del algoritmo RETE para aplicaciones en tiempo real. En efecto, resulta evidente que las mejoras de tiempo de ejecución logradas por el Centro de Investigación ELIN de Alcatel aumentan sustancialmente las posibilidades en tiempo real del algoritmo RETE.

Mejora del ciclo reconocimiento-acción

Las máquinas de inferencia actuales no han sido concebidas para el tratamiento de interrupciones. Sin embargo, se necesita este tipo de facilidades para resolver problemas en tiempo real. Normalmente durante el ciclo reconocimiento-acción (concordancia-selección-ejecución), los hechos no pueden modificarse ni borrarse dentro de interrupciones. Una ligazón variable, fuera del ámbito de una regla, es esencial para que un sistema experto sea enteramente gobernado por interrupciones.

PAMELA incorpora un sistema operativo que trata correctamente vectores de interrupción (Fig. 3). Dentro de las rutinas de interrupción, el usuario puede especificar las llamadas "órdenes-q" que permiten añadir hechos (Q_MAKE) a la memoria de trabajo, borrarlos (Q_REMOVE) o modificarlos (Q_CHANGE). Por ejemplo, cuando un conmutador pasa del estado "off" (desactivado) al estado "on" (activado), la sentencia Q_CHANGE relativa a este conmutador puede estar especificada en una rutina de servicio de interrupción.

El sistema operativo asegura que no se dan contradicciones en la red RETE. Así, cuando ocurre una interrupción mientras se está evaluando el lado izquierdo, esta interrupción podría fácilmente invalidar hechos actualmente válidos. Por lo tanto, para mantener la coherencia, el operador de colas ("queue handler") debe planificarse para puntos predeterminados del ciclo reconocimiento-acción, puntos que se definen implícitamente en la máquina de inferencia y que pueden también definirse de modo explícito por "ranuras de sincronización" en el lado derecho de las reglas.

Para proteger una regla o partes de su lado derecho contra la interrupción, puede aplicarse la orden "región" específica de PAMELA. Una región consta de un bloque de sentencias de lado derecho que no pueden ser interrumpidas. Esto puede compararse a un semáforo que cambia su valor al entrar o salir de una región. Esta característica es especialmente útil en

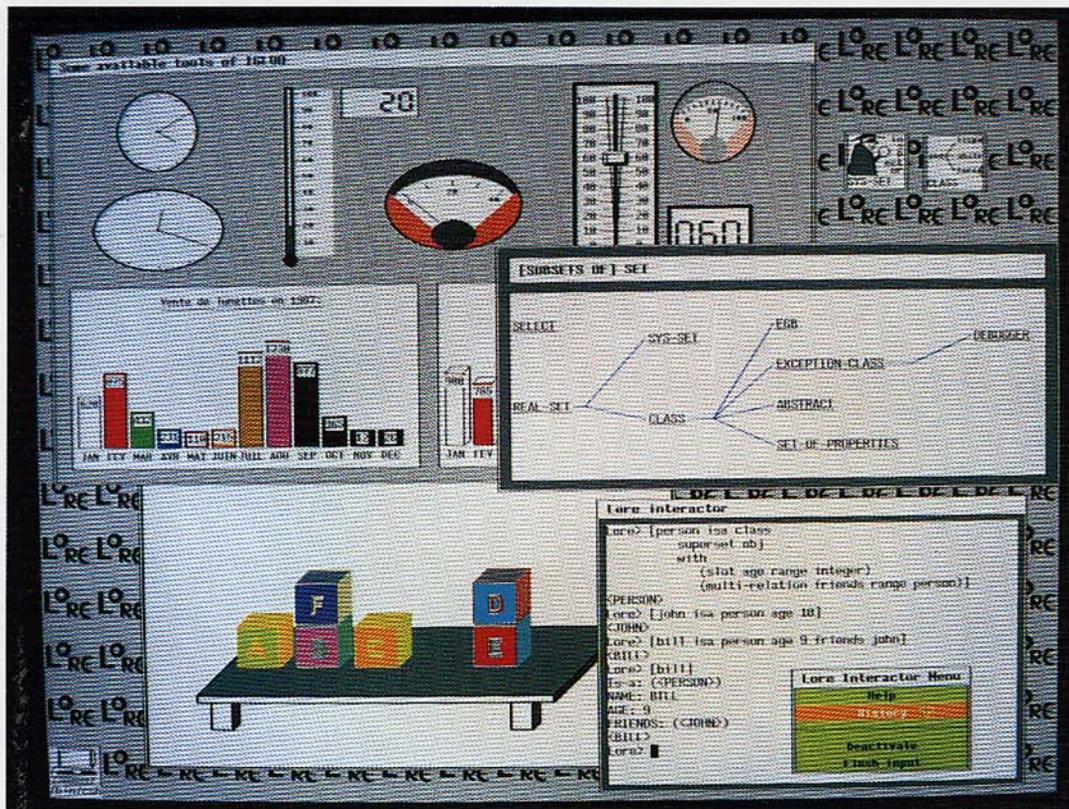


Figura 4
El entorno de programación LORE.

aplicaciones de control de proceso, donde hay secciones críticas a las que no puede interrumpir.

Todas las facilidades descritas en las secciones anteriores y el propio compilador PAMELA se han realizado en lenguaje C para asegurar su portabilidad. En particular, son aplicables a equipos basados en UNIX y VMS.

LORE

El diseño y la programación orientada al objeto han mejorado la especificación de los sistemas y la calidad del soporte lógico. El diseño orientado a objetos es un modo natural y original de especificar cierta clase de problemas describiendo los objetos que los componen, en lugar de especificar procedimientos aislados. La modularidad y la ocultación de información se logran mediante clases de objetos que materializan la abstracción de datos. La subclasificación, la herencia y el envío de mensajes son las propiedades fundamentales que permiten compartir el código, reutilizarlo y ampliarlo.

La programación orientada a objetos se utiliza ahora mucho en investigación aplicada, y empieza a ser reconocida por la industria. El interés por este enfoque de representación del conocimiento, formación de prototipos y simulación, ha movido a Laboratoires de Marcoussis a desarrollar un

nuevo entorno de programación basado en el lenguaje LORE orientado a objetos.

Un objeto consta de una estructura de datos (conjunto de atributos o ranuras) unida a un conjunto de operaciones o métodos que definen sus acciones potenciales. Los detalles internos del objeto (realización de cada operación, procedimientos y datos locales) se ocultan al usuario, partiendo de la idea, generalmente aceptada, de esconder la información: presentar a los usuarios una especificación funcional exterior, mientras que la especificación interna permanece oculta e inaccesible.

Las clases de objetos materializan tipos abstractos de datos sobre los que se pueden definir métodos. Las instancias de las clases son elementos de un tipo; cada una posee un determinado valor para cada ranura definida en su clase. La herencia distingue los lenguajes orientados a objetos de los lenguajes modulares como el ADA, ya que los tipos abstractos de datos (clases) pueden organizarse jerárquicamente: cada elemento de un tipo hereda las propiedades definidas en los tipos superiores. El protocolo de comunicaciones se basa en el envío de mensajes, que es una extensión de la noción de sobrecarga, teniendo en cuenta la herencia.

El entorno LORE de programación orientado a objetos

Dentro del enfoque LORE⁷, se ha desarrollado un modelo que potencia los aspectos

relacionales y de teoría de conjuntos de la programación orientada a objetos. LORE propone semánticas correctas para herencia múltiple, un conjunto expandido de clasificación que incluye las facilidades típicas de la programación orientada a objetos, y un modelo de ejecución basado en un proceso de reescritura que permite una compilación eficiente.

Se han integrado en LORE medios gráficos y de depuración que le confieren la calidad de entorno de programación.

El único modo de integrar las estructuras de datos y el control para los componentes de presentación, diálogo y aplicación de un sistema de gestión de interfaz de usuario, es descomponerlos en un conjunto relacional de objetos abstractos. Utilizando los conceptos de objetos, relaciones y propiedades es posible incorporar los requisitos de los gráficos, así como un tratamiento por reglas del diálogo usuario-sistema. El entorno gráfico LORE aporta tales funcionalidades (Fig. 4); basado en una máquina abstracta denominada NEIGE*, cumple la condición de portabilidad.

La programación orientada a objetos ha entrañado numerosas mejoras en cuanto a especificación de sistemas, calidad del soporte lógico y reutilización. Sin embargo, la mayoría de los lenguajes orientados a objetos actuales no se aprovechan de los estudios anteriores sobre tolerancia a fallos del soporte lógico. El entorno de depuración LORE incluye un sistema de tratamiento de excepciones, una herramienta de depuración y un ejecutor paso a paso⁸. En dicho sistema se integran algunas técnicas clásicas de tratamiento de excepciones en principio desarrolladas para lenguajes como los Clu y ADA, y se tienen en cuenta los aspectos específicos de diseño y ejecución de programas orientados a objetos, tales como el agrupamiento en clases de los comportamientos comunes y envío de mensajes. El entorno LORE se vale asimismo del poder expresivo de la programación orientada a objetos para proporcionar una representación eficaz y agradable al usuario de los programas de tratamiento de excepciones y del conocimiento sobre tales excepciones.

La herramienta basada en reglas ELOISE

En el campo de la inteligencia artificial, los lenguajes orientados a objetos sirven normalmente para representar conocimientos de naturaleza estática que a menudo complementan a razonamientos con reglas de producción y sus máquinas de inferencia asociadas. Los futuros entornos de programación de sistemas expertos incluirán

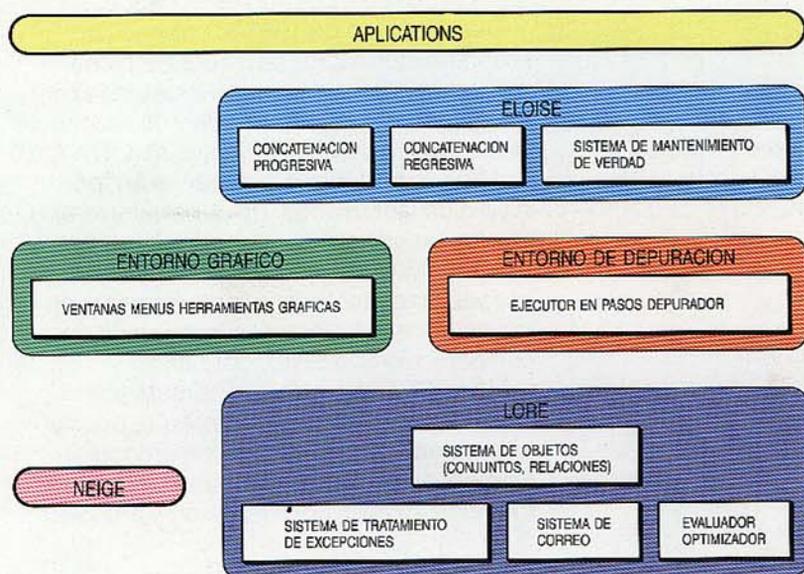
mecanismos para representación de conocimiento basados en objetos. Durante los dos últimos años, el trabajo en Laboratoires de Marcoussis ha hecho adquirir una considerable experiencia en construcción de sistemas expertos por medio del componente de programación orientada a objetos de LORE. Esto es importante, ya que muchas aplicaciones tienen gran necesidad de un componente de programación orientado a reglas. Por consiguiente, tras detenidos estudios y la construcción de herramientas prototipo para introducir en LORE la programación declarativa (Marie⁹, Milore¹⁰), se llegó al diseño de ELOISE¹¹, que es un entorno de programación orientado a reglas enteramente implantado en LORE. Las reglas ELOISE, organizadas en conjuntos, pueden modificar sistemas relacionales definidos en LORE añadiendo o quitando hechos en un paradigma eficiente llamado propagación. La "resolución del conflicto" puede acomodarse a cada caso por medio de objetos especiales llamados estrategias, que se pueden combinar en "pipes" ("tubos"), permitiendo refinadas operaciones de filtrado.

Entorno de programación del conocimiento modular e integrado

El lenguaje LORE, conjuntamente con su entorno gráfico y de depuración y con ELOISE, proporciona un entorno de programación del conocimiento modular, adaptable, expandible e integrado. Su arquitectura en capas se muestra en la figura 5, ilustrando la relación de "superposición" entre las herramientas que lo componen. Una herramienta puede utilizar cualquiera de las facilidades proporcionadas por las herramientas sobre las que está construida.

LORE y su entorno gráfico e interactivo aporta la uniformidad de representación

Figura 5
Un entorno de programación basado en objetos.



* Marca registrada de Laboratoires de Marcoussis

que aglutina todas las partes. Al examinar cómo la arquitectura sustenta la integración y el mantenimiento, deben señalarse dos aspectos. Primero, cuando se implanta una nueva herramienta o aplicación sobre las existentes, la naturaleza declarativa de los lenguajes de programación de las herramientas subyacentes se utiliza para construir una aplicación que sea lo más declarativa posible. Segundo, debido al modo en que se implantan las nuevas capas, es posible entender de diferentes maneras una herramienta (aplicación) dada, conforme sea el mecanismo de representación y razonamiento de las capas que están debajo.

El entorno de programación LORE, disponible ya para estaciones de trabajo SUN y DEC, se utiliza en proyectos de investigación conjuntos de Laboratoires de Marcoussis y las compañías del Grupo CGE, universidades y centros de investigación estatales. Desde junio de 1988, Alcatel ISR lo comercializa bajo el nombre de SPOKE*.

Aplicaciones para PAMELA y LORE

Se pueden utilizar PAMELA y LORE en varias aplicaciones. PAMELA es especialmente adecuado para sistemas expertos en tiempo real integrados, mientras que LORE está dedicado a crear modelos y prototipos de soporte lógico.

PAMELA se emplea actualmente con éxito en sistemas expertos para enclavamiento ferroviario en el proyecto ELEKTRA¹², conteniendo el mayor de ellos cerca de 400 reglas para comprobar las acciones de seguridad crítica en una estación de ferrocarril. Estos sistemas expertos se han elaborado en Alcatel Austria. Esta Compañía junto con el Centro de Investigación ELIN estudia las aplicaciones que implican gestión de red y control de procesos.

Desde marzo de 1987 el entorno de programación LORE se ha utilizado con éxito para desarrollar varios sistemas expertos, y sistemas de simulación y de reconocimiento de voz. Los principales son: DIVA¹³, sistema experto para la supervisión, por medio de vibraciones, de generadores a turbina (realizado en colaboración con ALSTHOM y EDF); AMPERE¹⁴, sistema basado en conocimiento para la reconfiguración de redes eléctricas (preparado en colaboración con EDF); por último, ESQUISSE⁷, un modelo de simulación simbólico admitido por Alcatel que puede manipularse en un entorno de programación específico para la construcción de modelos, control de simulación y análisis.

* Marca registrada de Laboratoires de Marcoussis

Finalmente, TOOPIE, un entorno de prototipos para desarrollo de soporte lógico de sistemas de telecomunicación, se preparará en colaboración con Alcatel CIT-S.

Se ha elegido asimismo SPOKE como entorno de programación para el proyecto AIM (Application to IBCN Maintenance, aplicación al mantenimiento de RICBA), que es parte del programa europeo RACE.

Perspectivas de desarrollo

Actualmente se está elaborando un concepto de estación de trabajo que incluye herramientas gráficas de gestión de base de conocimientos para los usuarios de PAMELA. Esta envoltura de gráficos portátil será aplicable a estaciones de trabajo con UNIX o VMS. Utilizando la envoltura podrá integrarse PAMELA en aplicaciones basadas en C y en ADA.

La versión en C de LORE asegurará una mayor eficacia y portabilidad y facilitará su integración en sistemas industriales. También se están diseñando las herramientas de soporte lógico para sistemas de información orientados a objetos. El proyecto desarrollará un sistema capaz de tratar grandes cantidades de datos, que haga inferencias respecto a los datos siguiendo un método basado en reglas y que exprese semánticas estructurales de una manera orientada a objetos.

Como PAMELA y LORE producirán código fuente C en el futuro, será posible integrar ambos en el mismo entorno.

Conclusiones

Durante varios años las compañías Alcatel han estudiado y desarrollado la tecnología de sistemas expertos para utilizarla en una extensa gama de aplicaciones.

PAMELA ha sido desarrollado especialmente para ayudar a resolver problemas de control de procesos en tiempo real. Sus características de eficacia y tratamiento de interrupciones van mucho más allá que el conjunto de constructores de otros lenguajes de sistemas de producción. Además, su portabilidad garantiza una fácil integración con la aplicación de la máquina de inferencia.

En los últimos años se ha visto con claridad que el diseño orientado a objetos conduce a numerosas mejoras en aspectos tales como interfaces gráficos y gobernados por menús, metodologías de desarrollo de soporte lógico, y sistemas basados en conocimiento. Para aprovechar estos perfeccionamientos, Laboratoires de Marcoussis ha desarrollado un nuevo entorno de programación apoyado en LORE.

Referencias

- 1 N. Theuretzbacher: Tecnología de sistemas expertos para sistemas de seguridad crítica en tiempo real: *Comunicaciones Eléctricas*, 1986, volumen 60, nº 2, págs. 147-153.
- 2 F. Barachini y N. Theuretzbacher: The Challenge of Real-Time Process-Control for Production Systems: *Proceedings of AAAI'88*, agosto 1988, Minneapolis.
- 3 J. McDermott, A. Newell y J. Moore: The Efficiency of Certain Production System Implementations: Pattern Directed Inference Systems, Waterman Hayes-Roth (editor), Nueva York, 1978.
- 4 D. P. Miranker: "TREAT": A New and Efficient Match Algorithm for AI Production Systems: *PhD Thesis*, Universidad de Columbia, 1987.
- 5 K. Oflazer: Partitioning in Parallel Processing of Production Systems, 1987.
- 6 C. L. Forgy: RETE: A Fast Algorithm for the Many Pattern/Many Object Pattern Matching Problem: *Artificial Intelligence*, volumen 21, 1982.
- 7 Ch. Benoit, Y. Caseau y Ch. Pherivong: Lore, un Langage Objet Relationnel et Ensembliste: *Comptes-rendus du 3^e atelier AFCET sur la programmation orientée-objet*, enero 1986, París.
- 8 Ch. Dony: An Exception Handling System for an Object-Oriented Language: *Proceedings of ECOOP'88*, agosto 88, Oslo.
- 9 Y. Caseau: Etude et Realisation d'un Langage Objet: Lore: *Thèse de l'Université Paris Sud*, Orsay, noviembre 1987.
- 10 M. Porcheron: MILORE — A Meta-Level Knowledge-Based Architecture for Production System Execution: *Proceedings of ECAI'88*, agosto 1988, Munich.
- 11 P. Dixneuf, A. Meller y M. Porcheron: ELOISE's Heart — An Efficient Frame for Production System Execution: *Proceedings of ECAI'88*, agosto 1988, Munich.
- 12 N. Theuretzbacher: ELEKTRA: A System Architecture that Applies New Principles to Electronic Interlocking: *Proceedings of IFAC*, 1986, Vienna.
- 13 J. M. David y J. P. Krivine: Acquisition de Connaissance a Partir de Situations Types: *Proceedings of Avignon'88*, junio 1988, Avignon.
- 14 O. Paillet y L. Dubost: AMPERE: a Knowledge-Based System for Network Reconfiguration: *Symposium on Expert System Applications to Power Systems*, agosto 1988, Estocolmo-Helsinki.

Franz Barachini nació en Austria en 1956. Estudió y se graduó Dipl-Ing en informática en la Universidad Técnica de Viena; en 1984 obtuvo un PhD en ciencias informáticas, en la misma universidad. Antes de entrar en Alcatel, trabajó dos años en Siemens y otros dos en ITT, en proyectos de soporte lógico para telecomunicaciones. El Dr. Barachini es ahora responsable del grupo de inteligencia artificial en el Centro de Investigación Alcatel ELIN.

Christophe Benoit nació en Francia en 1959. En 1984 presentó una tesis sobre ciencias informáticas en la Universidad de París VII. Se incorporó a Laboratoires de Marcoussis en 1983 para trabajar en el proyecto MAIA. En 1985 se le encomendó la programación orientada a objetos en la división de ciencias informáticas, dirigiendo ahora un grupo de investigación de esa división. Este grupo se dedica principalmente a metodologías y herramientas para sistemas de información avanzados.

Reglas de asignación de prioridades para optimizar tiempos de respuesta

La adecuada asignación de prioridades a tareas es importante para optimizar tiempos de respuesta y longitudes de cola en un sistema. Se han elaborado reglas generales utilizables para optimizar los sistemas actuales de Alcatel y los nuevos sistemas que se vayan desarrollando.

M. Villén Altamirano

Alcatel Standard Eléctrica, S.A.,
Madrid, España

Introducción

El esfuerzo de innovación en materia de tráfico, soporte al desarrollo de sistemas en Alcatel, ha producido modelos y herramientas que evalúan el comportamiento de tales sistemas ante el tráfico^{1,2}, y además los ha utilizado con éxito para mejorar esas características. Numerosas recomendaciones y propuestas de alternativas han permitido a los diseñadores optimizar los sistemas, mejorando su capacidad y prestaciones de tráfico, su resistencia a las sobrecargas y otras cualidades. Aunque haya recomendaciones específicas para aspectos concretos de un sistema, se ha procurado reiteradamente obtener recomendaciones y reglas generales que puedan aplicarse para mejorar tanto los sistemas presentes como los futuros.

Ocurre así con las reglas de asignación de prioridades, concebidas para optimizar tiempos de respuesta y longitudes de cola. Las prioridades determinan el orden en que se sirven los trabajos que están en espera de un recurso del sistema, y tienen sentido cuando se trata de trabajos que han de ser servidos por el mismo recurso, en este caso por el mismo procesador. No obstante, estas reglas valen para optimizar tanto sistemas mono como multiprocesadores, aplicándose en estos últimos a cada uno de los procesadores.

Tradicionalmente, la asignación de prioridades se ha basado en el principio de dar mayor prioridad a los trabajos con exigencias más rigurosas en tiempo de respuesta (o en número de trabajos en cola). Este principio reduce los tiempos de respuesta de los trabajos más urgentes a expensas de aumentar los de los restantes trabajos, pero ello no mejora en general el tiempo de respuesta del sistema.

Por el contrario, las reglas de asignación de prioridades aquí descritas conducen a

una mejora global del sistema, minimizando tanto el tiempo medio de respuesta a todos los trabajos como el valor medio del número total de trabajos en cola. Una juiciosa combinación de dichas reglas con las de asignación de mayor prioridad a los trabajos más urgentes, conducirá a una asignación de prioridades óptima en cada aplicación. Se ha descrito anteriormente un importante avance en la definición de reglas de asignación de prioridades³. El presente artículo ofrece el fundamento teórico de estas reglas, que permite generalizarlas y refinarlas.

Las reglas presentadas se basan en una ley de conservación⁴, según la cual, sujeto a ciertas condiciones, el trabajo medio pendiente en un sistema (esto es, el valor medio del tiempo que se necesitaría para dar servicio a todos los trabajos presentes en el sistema en un instante aleatorio si ningún trabajo nuevo llegara después de dicho instante) es independiente de la disciplina de servicio de la cola. Esta ley se demuestra aquí para un sistema $M/G/1$ (llegadas Markovianas, ley de servicio general y servidor único), con las dos condiciones siguientes en las disciplinas de servicio de la cola: que el servidor nunca esté parado si hay trabajos pendientes, y que la disciplina no afecte al tiempo total empleado en servir un trabajo.

Basándose en esta ley, se deduce un principio general de asignación de prioridades que posteriormente se aplica a un sistema multiprioridad con encadenamiento de tareas y con prioridades sin interrupción, con interrupción o mixtas.

Ley de conservación

Sea un sistema $M/G/1$ al que llegan trabajos de tipo i ($1 \leq i \leq n$) con tasas de llegadas η_i . Sea $F_i(t)$ la función de distribución com-

plementaria del tiempo de servicio, de trabajos de tipo i . El tiempo medio de servicio h_i y el tiempo medio de servicio residual h_i^r se deducen de $F_i(t)$:

$$h_i = \int_0^{\infty} F_i(t) dt \tag{1}$$

$$h_i^r = \frac{1}{h_i} \int_0^{\infty} t F_i(t) dt \tag{2}$$

Siendo ρ_i la carga producida al procesador por los trabajos i , ρ la carga total del procesador y η la tasa total de llegadas, se verifica que:

$$\rho_i = \eta_i h_i, \rho = \sum_{\forall i} \rho_i, \eta = \sum_{\forall i} \eta_i \tag{3}$$

Sea O_i el instante en el que un trabajo i llega y t_i el instante en el que solamente ha transcurrido un tiempo de servicio t de un trabajo incompleto i . Basándose en esta notación se definen las siguientes variables dependientes de la disciplina de servicio de la cola:

– $T_i(t)$ es el tiempo medio total transcurrido entre los instantes O_i y t_i de un trabajo i (con tiempo de servicio superior a t). $T_i(t)$ incluye el tiempo t que se le ha estado sirviendo y el tiempo que ha estado en cola o interrumpido.

– $\phi(i, t, m, \tau)$ es la probabilidad de que, cuando un trabajo i (con tiempo de servicio superior a t) llega al sistema entre los instantes O_m y τ_m de un trabajo m (con tiempo de servicio superior a τ), el instante t_i ocurra antes que el instante τ_m .

El trabajo medio pendiente en el sistema, B , se calcula por el diferencial de tiempo de servicio dt comprendido entre los instantes t_i y $(t + dt)$, de los trabajos i (con tiempo de servicio superior a t) que están, en un momento aleatorio, entre los instantes O_i y t_i . Como el número medio de trabajos i en esta situación es $\eta_i T_i(t) F_i(t)$, resulta:

$$B = \sum_{\forall i} \eta_i \int_0^{\infty} T_i(t) F_i(t) dt \tag{4}$$

Para evaluar la expresión (4), obtengamos primero una expresión de $T_i(t)$ para un trabajo de muestra i . $T_i(t)$ se puede dividir en los siguientes componentes:

$$T_i(t) = t + B - C_i(t) + D_i(t) \tag{5}$$

En esta expresión, t es la componente debida al servicio del propio trabajo i , mientras que $B - C_i(t)$ es la parte debida al servicio de los trabajos m que están en el sistema cuando llega el trabajo de muestra i . Esta última componente es igual al trabajo pendiente en O_i (que por ser la llegada poissoniana es igual a B), menos $C_i(t)$,

parte de dicho trabajo que no ha sido realizado en el instante t_i . El término B viene dado por la expresión (4); $C_i(t)$ viene dado por la diferencial de tiempo de servicio dt comprendida entre los instantes τ_m y $(\tau + dt)_m$, de los trabajos m (con tiempo de servicio superior a τ) que, cuando el trabajo i llegó, estaban entre los instantes O_m y τ_m y para los que, de acuerdo con la disciplina de servicio, su instante τ_m ocurre después del instante t_i . Así pues la expresión para $C_i(t)$ es similar a la de B , pero con el integrando multiplicado por $\phi(i, t, m, \tau)$:

$$C_i(t) = \sum_{\forall m} \eta_m \int_0^{\infty} T_m(\tau) F_m(\tau) \phi(i, t, m, \tau) d\tau \tag{6}$$

La componente final $D_i(t)$ es debida al servicio de los trabajos m que llegan al sistema entre los instantes O_i y t_i del trabajo de muestra i . El número medio de trabajos m que llegan en ese intervalo es $\eta_m T_i(t)$. Cada uno de ellos contribuye a $D_i(t)$ con la diferencial de tiempo de servicio $d\tau$ comprendida entre τ_m y $(\tau + d\tau)_m$ siempre y cuando su tiempo de servicio sea superior a τ y que su instante τ_m ocurra antes que t_i . La probabilidad de que se dé tal contribución es $F_m(\tau) \eta(m, \tau, i, t)$, y, por tanto, $D_i(t)$ viene dado por:

$$D_i(t) = \sum_{\forall m} \eta_m T_i(t) \int_0^{\infty} F_m(\tau) \phi(m, \tau, i, t) d\tau \tag{7}$$

Sustituyendo la expresión (5) de $T_i(t)$ en la ecuación (4) se obtiene:

$$B = \sum_{\forall i} \eta_i \int_0^{\infty} t F_i(t) dt + B \sum_{\forall i} \eta_i \int_0^{\infty} F_i(t) dt - \sum_{\forall i} \eta_i \int_0^{\infty} C_i(t) F_i(t) dt + \sum_{\forall i} \eta_i \int_0^{\infty} D_i(t) F_i(t) dt \tag{8}$$

Los últimos dos términos de la expresión anterior son iguales, como se puede ver sustituyendo $C_i(t)$ y $D_i(t)$ por sus respectivas expresiones (6) y (7) y, por tanto, se cancelan. Así, pues, sustituyendo las expresiones (1), (2) y (3) en la expresión (8) obtenemos:

$$B = \sum_{\forall i} \rho_i h_i^r / (1 - \rho) \tag{9}$$

La expresión (9) muestra que el trabajo medio pendiente sólo depende de ρ_i y h_i^r , siendo por tanto independiente de la disciplina de servicio de la cola. Esta ley de conservación tiene una explicación intuitiva: la disciplina de servicio de la cola afecta al orden en el que se ejecuta el trabajo en cola, y por tanto sólo a la clase de trabajo pero no a la cantidad de trabajo que queda pendiente de ejecución.

Principio de asignación de prioridades

Para poder deducir de la ley de conservación anterior un principio de asignación de prioridades, vamos a expresar B de una forma distinta a la de la expresión (4). El trabajo medio pendiente, B , está compuesto por el tiempo de servicio residual de los trabajos i que están en el sistema en un instante aleatorio. Definimos $H'_i(t)$ como el tiempo de servicio residual de los trabajos i que están entre los instantes t_j y $(t + dt)_j$. Dado que el número medio de trabajos en tal situación es $\eta_i F_i(t) d(T_i(t))$, B también se puede expresar de la siguiente manera:

$$B = \sum_{\forall i} \eta_i \int_0^\infty F_i(t) d(T_i(t)) H'_i(t) = \text{const} \quad (10)$$

El parámetro a optimizar es el tiempo medio de respuesta del sistema, es decir, el valor medio ponderado de los tiempos medios de respuesta a todos los trabajos. Dado que TR_i , tiempo medio de respuesta al trabajo i , viene expresado por:

$$TR_i = \int_0^\infty F_i(t) d(T_i(t)) \quad (11)$$

el tiempo medio de respuesta del sistema, TMR , será:

$$TMR = \sum_{\forall i} \frac{\eta_i}{\eta} \int_0^\infty F_i(t) d(T_i(t)) \quad (12)$$

Según la ley de Little, $\eta \cdot TMR$ es el número medio de trabajos en el sistema. Por tanto, al optimizar TMR , también se optimiza la longitud total de la cola.

Aparte del factor constante $1/\eta$, la expresión (12) es una suma de términos $\eta_i F_i(t) d(T_i(t))$. Puesto que, conforme a la expresión (10), la suma de estos términos ponderados con $H'_i(t)$ es independiente de la disciplina de servicio, TMR disminuirá si los términos $\eta_i F_i(t) d(T_i(t))$ correspondientes a un menor $H'_i(t)$ disminuyen. La manera de disminuir un término $\eta_i F_i(t) d(T_i(t))$ es asignarle una mayor prioridad al trabajo i cuando esté en el instante t_j . Esto nos lleva al siguiente principio de asignación de prioridades:

“La prioridad de cada trabajo en cada instante debe ser mayor si su tiempo de servicio residual en ese instante es menor”.

Este principio es una generalización del conocido aviso “antes de entrar dejen salir” que aparece en las puertas de muchos medios de transporte públicos. Aquí se ha demostrado para un sistema con llegadas Poissonianas, pero probablemente se podría extender a otras leyes de llegada, y de hecho el autor así lo recomienda.

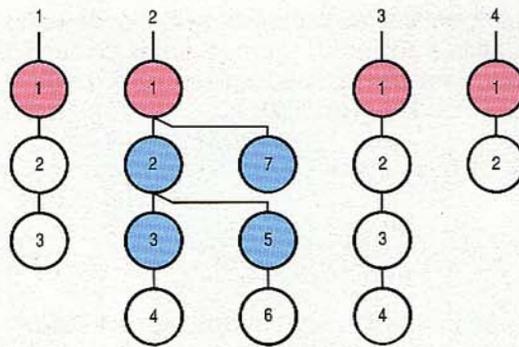


Figura 1
Ejemplo de cuatro secuencias de tareas. Cada círculo es una tarea. Las tareas de cada secuencia están numeradas.

Sistemas multiprioridad con encadenamiento de tareas

Sea un sistema $M/G/1$ en el que los trabajos que llegan son secuencias de tareas como se muestra en la figura 1. Cuando una secuencia llega, su primera tarea (indicada con un círculo rojo) se pone en cola. Al completarse cada tarea, se ponen en cola la tarea o las tareas (en caso de bifurcación) encadenadas a ella. Se puede definir cualquier número de tipos de secuencias, cada una con su propia estructura predefinida. Cada tarea dentro de cada secuencia tiene una ley de servicio diferente, independiente y general. Este modelo se ha resuelto¹ y se ha materializado en una herramienta de ordenador denominada modelo de prestaciones de tráfico, TPM, con la cual se han evaluado los tiempos de respuesta en el Sistema 12 de conmutación digital². Los resultados obtenidos del TPM se utilizan aquí para comparar tiempos de respuesta aplicando distintas reglas de asignación de prioridades.

Las definiciones de η_b , η , ρ_b , ρ , h_b y h'_i se mantienen, considerando ahora cada secuencia como un trabajo. Además, se necesita definir nuevas variables referidas a tareas.

Sean, respectivamente $h_{i,j}$ y $h'_{i,j}$ los tiempos medios de servicio y de servicio residual de la tarea j en la secuencia i , que denominaremos tarea (i, j) .

Se define $W_{i,j}$ como el tiempo medio transcurrido desde el instante en que la tarea (i, j) se pone en cola hasta el instante en que comienza su servicio y $h^e_{i,j}$ como el tiempo medio transcurrido desde que comienza hasta que se completa su servicio, incluyendo el tiempo que haya estado interrumpida.

Asimismo, para relacionar tareas de la misma secuencia se escribe: $(i, k) > (i, j)$ si, debido a la estructura de la secuencia, la tarea (i, k) se sirve necesariamente después que la tarea (i, j) . Por ejemplo, en la figura 1, $(1,3) > (1,1)$ y $(2,6) > (2,2)$, pero $(2,6) \not> (2,7)$ y $(2,7) \not> (2,6)$.

Se llama además H^r_{ij} a la suma de los tiempos medios de servicio, $h_{i,k}$, de todas las tareas en las que $(i, k) \geq (i, j)$, y $H^s_{i,j}$ a la suma del tiempo medio de servicio residual de la tarea (i, j) ($h^r_{i,j}$), y de los tiempos medios de servicio, $h_{i,k}$, de todas las tareas donde $(i, k) > (i, j)$.

Utilizando esta notación, la ley de conservación dada por las expresiones (9) ó (10) se puede escribir así:

$$\sum_{\forall i} \eta_i \sum_{\forall j} (W_{i,j} H^r_{i,j} + h^e_{i,j} H^s_{i,j}) = \sum_{\forall i} \rho_i h^r_i / (1 - \rho) \quad (13)$$

y el tiempo medio de respuesta del sistema:

$$TMR = \sum_{\forall i} \frac{\eta_i}{\eta} \sum_{\forall j} (W_{i,j} + h^e_{i,j}) \quad (14)$$

Como TMR incluye el tiempo medio de servicio de todas las secuencias (que es igual a ρ/η cualquiera que sea la asignación de prioridades), la diferencia $TMR - (\rho/\eta)$, llamada TME (tiempo medio de espera del sistema), será utilizada para comparar las distintas alternativas.

Prioridades sin interrupción

Sea un sistema con prioridades sin interrupción $\rho_{i,j}$ asignadas a tareas. ($\rho_{i,j} < \rho_{m,n}$ significa que la prioridad de la tarea (i, j) es mayor que la prioridad de la tarea (m, n) , ya que a la prioridad máxima se le llama prioridad 1). La prioridad determina el orden en que se sirven las tareas en cola, pero a la que ya haya empezado su servicio no se la interrumpe. Las tareas que tienen la misma prioridad se sirven según el orden de llegada.

Como en este caso no existe interrupción de tareas, $h^e_{i,j}$ es siempre igual a $h_{i,j}$ con independencia de las prioridades que se asignen. Por tanto, sólo los términos correspondientes a $W_{i,j}$ se pueden optimizar en la expresión (14). Conforme al principio establecido, la optimización se hace asignando

mayor prioridad a las tareas con menor $H^r_{i,j}$ (véase expresión (13)). Así, si para las tareas (i, j) y (m, n) se verifica que $H^r_{m,n} > H^r_{i,j}$, deberá ser $\rho_{m,n} > \rho_{i,j}$. En el caso de que $H^r_{m,n} = H^r_{i,j}$, los valores relativos de $\rho_{i,j}$ y $\rho_{m,n}$ no importan.

Consideremos el ejemplo de la figura 1. El tiempo de servicio de las tareas se considera constante (por lo que $h^r_{i,j} = h_{i,j}/2$) con los valores dados en la primera fila de la figura 2. Las filas segunda y tercera de esta tabla muestran respectivamente, para cada tarea, los valores deducidos de $H^r_{i,j}$ y $H^s_{i,j}$. Los ritmos de llegada de las secuencias son tales que se verifica:

$$\rho_1 = \rho_2 = \rho_3 = \rho_4.$$

La figura 3 presenta varios ejemplos de asignación de prioridades. En el caso a, se ha realizado la asignación óptima; en el b, todas las tareas tienen la misma prioridad, y en el caso c, la asignación de prioridades es inversa a la óptima. La figura 4 muestra la espectacular reducción del tiempo de respuesta cuando se hace la asignación óptima. Comparando este caso con el de igual prioridad (caso b), el TME se reduce más del 50% para una carga de procesador de 0,6, y en aproximadamente dos tercios para carga 0,9. Comparándola con el caso de peor asignación (caso c), la diferencia es todavía más drástica: la reducción del TME ronda el 80% y el 90% para cargas de procesador de 0,6 y 0,9 respectivamente.

En el caso d de la figura 3, sólo se ha seguido en parte el principio de asignación de prioridades; por ejemplo, las tareas (2,2) y (3,3) tienen la misma prioridad aunque $H^r_{2,2} > H^r_{3,3}$. No obstante, se obtiene el mismo TME en el caso d que en el a. Este resultado sorprendente se debe a que las tareas (2,2) y (3,3) nunca están simultáneamente en cola (ni en el caso a ni en el d), y por tanto sus prioridades relativas no afectan al orden en que se sirven. Se ha realizado un estudio de las tareas que no pueden estar simultáneamente en cola⁵, y con base en sus resultados, las dos reglas siguientes son suficientes para optimizar el sistema:

SECUENCIA	1			2				3				4				
TAREA	1	2	3	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	1	2
$h_{i,j}$	13,0	1,0	1,0	2,0	1,0	3,0	2,0	3,0	1,0	1,0	2,0	2,0	6,0	1,0	1,0	2,0
$H^r_{i,j}$	15,0	2,0	1,0	13,0	10,0	5,0	2,0	4,0	1,0	1,0	11,0	9,0	7,0	1,0	3,0	2,0
$H^s_{i,j}$	8,5	1,5	0,5	12,0	9,5	3,5	1,0	2,5	0,5	0,5	10,0	8,0	4,0	0,5	2,5	1,0

Figura 2
Tiempos de servicio de tarea, $h_{i,j}$, y variables deducidas, $H^r_{i,j}$ y $H^s_{i,j}$ del ejemplo.

Figura 3
Prioridades asignadas a tareas en los casos probados.

SECUENCIA		1			2							3				4	
TAREA		1	2	3	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	1	2
SIN INTERRUCCION	a	11	2	1	10	8	5	2	4	1	1	9	7	6	1	3	2
	b	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	c	1	10	11	2	4	7	10	8	11	11	3	5	6	11	9	10
	d	7	1	1	6	4	4	1	3	1	1	5	4	4	1	2	1
	e	8	3	2	1	7	5	3	4	2	2	1	6	5	2	1	3
	f	1	3	2	1	7	5	3	4	2	2	1	6	5	2	1	3
	g	3	1	1	3	2	2	1	1	1	1	2	2	2	1	1	1
	h	3	1	1	3	2	2	1	2	1	1	3	2	2	1	2	1
	i	3	1	1	3	3	2	1	2	1	1	3	3	3	1	2	1
CON INTERRUCCION	j	7	1	1	6	4	4	1	2	1	1	5	4	4	1	2	1
	k	6	1	1	6	4	4	1	2	1	1	5	4	4	1	2	1
	l	5	1	1	5	4	4	1	2	1	1	5	4	4	1	2	1
MIXTA	p	7	1	1	6	4	4	1	3	1	1	5	4	4	1	2	1
	m π	5	1	1	6	4	4	1	2	1	1	5	4	4	1	2	1

Regla 1. Considerando una tarea (i, j) que sea la primera de su secuencia (de color rojo en la figura 1) y otra tarea cualquiera (m, n) :

si $H^r_{m,n} > H^r_{i,j}$, deberá ser $p_{m,n} > p_{i,j}$;

si $H^r_{m,n} < H^r_{i,j}$, deberá ser $p_{m,n} < p_{i,j}$.

Regla 2. Dadas dos tareas (i, j) e (i, n) , ambas cabeceras de rama (de color azul en la figura 1) de una misma secuencia y naciendo de la misma bifurcación:

si $H^r_{i,n} > H^r_{i,j}$ deberá ser $p_{i,n} > p_{i,j}$, y $p_{i,n} > p_{i,k}$ para cualquier otra tarea en la que $(i, k) > (i, j)$.

Por ejemplo, en la figura 3 se verificará:
 $p_{2,2} > p_{2,7}$, $p_{2,3} > p_{2,5}$, y $p_{2,3} > p_{2,6}$.

Si se siguen estas dos reglas, no importan las prioridades relativas de cualquier otro par de tareas. Esto permite reducir el número de prioridades necesarias en el sistema.

Se recomienda el siguiente procedimiento de optimización, conforme a las dos reglas mencionadas: se ordenan primeramente las tareas que son cabecera de secuencia según el valor de $H^r_{i,j}$, asignándoles prioridad de acuerdo con ello (en la figura 3, caso d, $p_{1,1} = 7$, $p_{2,1} = 6$, $p_{3,1} = 5$, y $p_{4,1} = 2$). Se asignan después prioridades a las otras tareas comparando su $H^r_{i,j}$ con el de las tareas cabecera de secuencia (en la figura 3 y caso d, $p_{2,2} = p_{2,3} = p_{2,5} = p_{3,2} = p_{3,3} = 4$, y $p_{1,2} = p_{1,3} = p_{2,4} = p_{2,6} = p_{2,7} = p_{3,4} = p_{4,2} = 1$). En tercer lugar, se modifican las prioridades de las tareas que no cumplen la regla 2 (en la figura 3, caso d, $p_{2,5}$ se ha cambiado de 4 a 3).

En aplicaciones prácticas, hay restricciones del sistema o exigencias en el tiempo

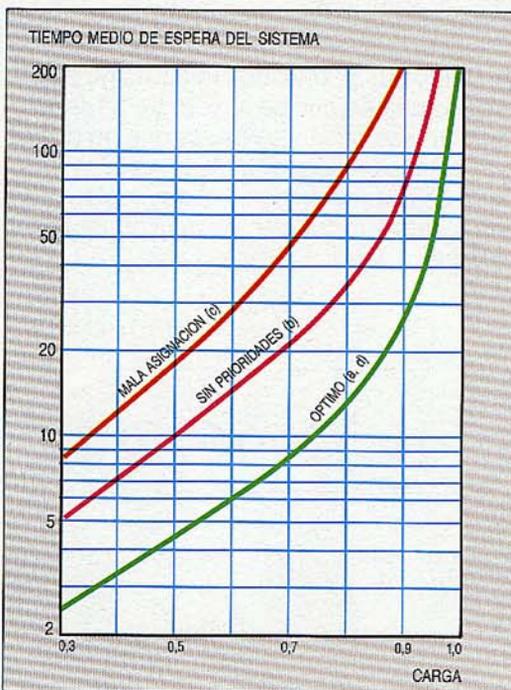


Figura 4
Asignación de prioridades sin interrupción: tiempo medio de espera del sistema en varios casos.

Figura 5
Impacto en el tiempo medio de espera del sistema y en el tiempo de espera de las tareas (i, 1) de la asignación de máxima prioridad a dichas tareas. Valores para una carga de 0,6 Erl.

	TIEMPO MEDIO DE ESPERA DEL SISTEMA	TIEMPO DE ESPERA DE TAREAS			
		1,1	2,1	3,1	4,1
d	6,0	14,3	8,2	5,3	2,4
e	7,2	14,3	1,6	1,6	1,6
f	9,7	1,9	1,9	1,9	1,9

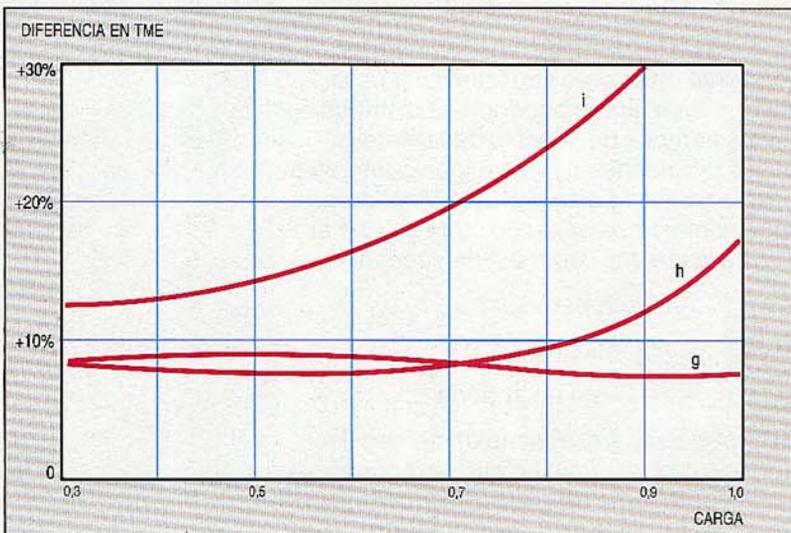
de respuesta a secuencias o tareas que pueden obligar a asignar a alguna tarea una prioridad distinta a la que le correspondería según las reglas anteriores. No obstante, deberán aplicarse tales reglas a las restantes tareas a fin de conseguir el mejor TME posible dentro de tales condiciones. Merece especial atención el caso de una tarea cabecera de secuencia (o de rama) a la que haya que asignarle una prioridad más alta que la resultante de estas reglas. Entonces la tarea o (en caso de bifurcación) tareas posteriores encadenadas a ella deben tratarse, al aplicar las reglas anteriores, como si fueran cabecera de la correspondiente secuencia (o rama). Por ejemplo, si en el caso d, $p_{3,1}$ se hace igual a 1, la tarea (3,2) debe considerarse cabecera de la secuencia 3. Si también ha habido que asignar una prioridad mayor a alguna de las segundas tareas, se transmitiría a las correspondientes terceras tareas el "derecho de cabecera", y así sucesivamente.

Los casos e y f de la figura 3 corresponden a una situación con exigencias muy estrictas en el tiempo de espera de las primeras tareas de la secuencia. Así, en el caso e, se ha asignado la máxima prioridad a las tareas (2,1), (3,1) y (4,1), y en el caso f, también a la tarea (1,1). Las prioridades de las restantes tareas se asignan de acuerdo con lo anterior. En la figura 5 se aprecian los resultados comparados con los del caso d: el tiempo de espera de las primeras tareas ha mejorado a expensas del tiempo medio

de espera del sistema, TME. Nótese que el cambio de prioridad de la tarea (1,1) tiene un mayor impacto en el TME que el cambio conjunto de prioridad de las tareas (2,1), (3,1) y (4,1). Ello se debe a que (1,1) causa en el procesador más carga que las otras tres juntas, y a que su cambio de prioridad respecto al valor óptimo es mayor. De cualquier modo, el valor del TME para e y f es mejor que el obtenido en el caso sin prioridades (caso b), lo cual demuestra que se pueden obtener buenas soluciones de compromiso aun cuando haya condicionantes.

En algunos sistemas puede estar limitado el número de prioridades distintas. En tales casos, a las tareas con similar valor de $H_{i,j}^r$ se les asignaría la misma prioridad. De las varias soluciones que se pueden obtener por este procedimiento, se puede escoger la mejor utilizando el TPM². En los casos g, h e i de la figura 3, el número de prioridades distintas se ha reducido a tres. Se han escogido las soluciones que dan un menor TME para carga 0,9 (caso g) y para carga 0,6 (caso h). A efectos de comparación, se muestra también una solución que da resultados peores (caso i). La figura 6 muestra las diferencias relativas con respecto a la asignación óptima (caso d), pudiendo apreciarse que, con la ayuda del TPM, se puede obtener una solución, como la del caso g, muy próxima a la óptima.

Figura 6
Asignación de tres prioridades sin interrupción: diferencias relativas en tiempo medio de espera del sistema, para diversos casos con respecto al óptimo (caso d).



Prioridades con interrupción

Consideremos ahora el caso de prioridades con interrupción, del tipo reanudación; una tarea en servicio es interrumpida si llega otra de mayor prioridad, reanudándose después de la interrupción el servicio de la primera en el punto donde fue interrumpida.

En este sistema, tanto $W_{i,j}$ como $h_{i,j}^e$ dependen de las prioridades asignadas. Por tanto, en el proceso de optimización se deben considerar todos los términos de las expresiones (13) y (14). Sin embargo, en este proceso hay algunas limitaciones debidas a que $W_{i,j}$ y $h_{i,j}^e$ están gobernadas por la misma prioridad, $p_{i,j}$. Considérense dos tareas (i, j) y (m, n); de acuerdo con el orden en que deben servirse cuando ambas están en cola, deberían recibir las siguientes prioridades, :

$$p_{m,n} > p_{i,j} \text{ si } H_{m,n}^r > H_{i,j}^r$$

$$p_{m,n} < p_{i,j} \text{ si } H_{m,n}^r < H_{i,j}^r$$

No importa la asignación si $H_{m,n}^r = H_{i,j}^r$.

Sin embargo, en el caso de que la tarea (i, j) sea cabecera de secuencia, la posibilidad de interrupción de la tarea (m, n) por la tarea (i, j) se debe regir por las siguientes reglas:

$$p_{m,n} > p_{i,j} \text{ si } H_{m,n}^s > H_{i,j}^r$$

$$p_{m,n} \leq p_{i,j} \text{ si } H_{m,n}^s < H_{i,j}^r$$

No importa la asignación si $H_{m,n}^s = H_{i,j}^r$.

Se podrían formular relaciones similares si la tarea (m, n) fuera cabecera de secuencia (la posibilidad de interrupción sólo se ha de considerar si una de las dos tareas es cabecera de secuencia, ya que sólo estas tareas pueden interrumpir).

Cuando se aplican las reglas anteriores pueden surgir contradicciones. Si los tiempos de servicio de las tareas tienen una distribución hipoexponencial ($h_{m,n}^r < h_{m,n}^s$ y por tanto $H_{m,n}^s < H_{m,n}^r$), la contradicción aparece al verificarse, siendo (i, j) cabecera de secuencia, que $H_{m,n}^s < H_{i,j}^r < H_{m,n}^r$. Atendiendo al criterio del orden en que deben servirse, la mejor solución es $p_{m,n} > p_{i,j}$ y según el criterio de interrupción, $p_{m,n} \leq p_{i,j}$. En este caso la mejor solución, considerando ambos efectos, podría ser $p_{m,n} > p_{i,j}$ o bien $p_{m,n} = p_{i,j}$. Normalmente la primera solución es mejor para cargas altas y la segunda para cargas bajas³.

Para la optimización se recomienda empezar con la solución basada en el criterio del orden de servicio, esto es, con la misma que para el caso de no haber interrupción. Seguidamente, comparando el $H_{m,n}^s$ de cada tarea con $H_{i,j}^r$ de las tareas cabecera de secuencia, determinar qué valor debe darse a $p_{m,n}$ de acuerdo con el criterio de interrupción. Si este valor fuera distinto del inicial, debería utilizarse el TPM² para comparar los resultados obtenidos con uno y otro valor, y así elegir el que mejor se comporte dentro del margen de carga de interés.

En el ejemplo de la figura 1 aparecen contradicciones entre ambos criterios al determinar la prioridad entre la tarea (1,1) y las (2,1) y (3,1), así como entre la tarea (2,5) y la (4,1). Los resultados obtenidos con el TPM demuestran que, entre las tareas (2,5) y (4,1) la mejor solución es $p_{2,5} = p_{4,1}$, mientras que entre las tareas (1,1), (2,1) y (3,1) la mejor solución depende de la carga del procesador. Los casos j, k y l de la figura 3 corresponden a las tres asignaciones de prioridades posibles a estas últimas tareas. La figura 7 muestra las diferencias relativas en el TME de estos tres casos con interrupción, con respecto al mejor caso sin interrupción (d). Puede verse que la mejora con respecto a este último no es muy apreciable, y que no siempre puede garantizarse para todo el margen de carga. Por tanto, en este caso (y en general en todos aquéllos en los que haya muchas tareas por secuencia) la implantación de prioridades con interrupción no está justificada por la mejora del tiempo medio de respuesta del sistema,

aunque sí puede estarlo por otras razones, tales como la existencia de tareas o secuencias con estrictos requisitos de tiempo de respuesta.

Prioridades mixtas (con interrupción/sin interrupción)

Para el Sistema 12 se adoptó una combinación flexible de prioridades con interrupción (tipo reanudación) y sin interrupción². En tal

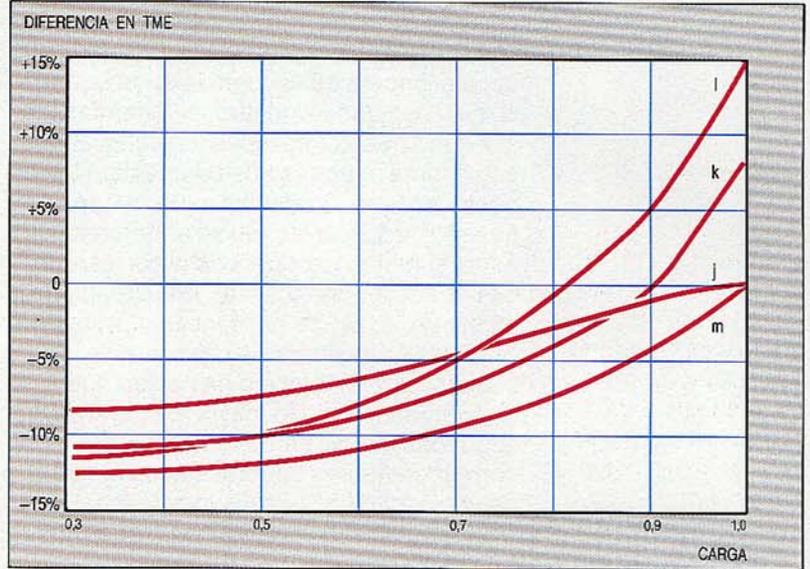


Figura 7
Asignación de prioridades con interrupción (casos j, k, l) y mixtas (caso m): diferencias relativas en tiempo medio de espera del sistema respecto al óptimo sin interrupción (caso d).

enfoque, cada tarea (m, n) tiene una prioridad cuando está en cola $p_{m,n}$ y una prioridad $\pi_{m,n}$ cuando está en servicio (o interrumpida), tal que $\pi_{m,n} \leq p_{m,n}$. Las prioridades $p_{m,n}$ determinan el orden en el que se sirven las tareas en cola; la prioridad $\pi_{m,n}$ de una tarea en servicio (o interrumpida) determina si ésta puede ser interrumpida o no por una tarea (i, j) que llegue: (m, n) será interrumpida si $\pi_{m,n} > p_{i,j}$.

Con este esquema, desaparece la ambigüedad en la asignación de prioridades existente en el caso con interrupción, al menos si es hipoexponencial la distribución de los tiempos de servicio de las tareas.

Las prioridades $p_{m,n}$ se eligen como en el caso sin interrupción, y las prioridades $\pi_{m,n}$ mediante comparación de su $H_{m,n}^s$ con el $H_{i,j}^r$ de las tareas cabecera de secuencia:

si $H_{m,n}^s > H_{i,j}^r$ deberá ser $\pi_{m,n} > p_{i,j}$

si $H_{m,n}^s < H_{i,j}^r$ será $\pi_{m,n} \leq p_{i,j}$

si $H_{m,n}^s = H_{i,j}^r$ esto no importa.

Sólo si la tarea (m, n) tiene un tiempo de servicio con distribución hiperexponencial podría obtenerse de las reglas anteriores un valor $\pi_{m,n} > p_{m,n}$. Si así sucede, al no

estar permitido, debe cambiarse $\pi_{m,n}$ para igualarla a $p_{m,n}$, o viceversa, eligiendo la mejor solución mediante la herramienta TPM.

El caso m de la figura 3 se basa en este método, y sus resultados se exponen en la figura 7. Puede apreciarse que, para cualquier carga, los resultados obtenidos con m son siempre mejores que los correspondientes a los casos sin interrupción (d) y con interrupción (j, k y l). En consecuencia, se recomienda este esquema mixto, sobre todo en los sistemas en los que por otras razones se necesiten interrupciones, ya que una vez implantadas éstas, la distinción entre prioridad en servicio y prioridad en cola es normalmente fácil de llevar a efecto.

Conclusiones

Se han desarrollado reglas para optimizar las prestaciones de un sistema (tanto en tiempos de respuesta como en longitud de colas) mediante la adecuada asignación de prioridades a las tareas. Aunque estas reglas afectan a la asignación de prioridades a tareas servidas por un mismo procesador, también se pueden optimizar las prestaciones de un sistema multiprocesador aplicando dichas reglas a cada uno de los procesadores del sistema.

Los ejemplos de aplicación de estas reglas a casos prácticos demuestran que con ellas se puede conseguir reducir los tiempos medios de espera y las longitudes de cola a la mitad o incluso a la tercera parte de los valores obtenidos con una sola prioridad.

Aunque las reglas son fruto del trabajo de investigación dedicado a mejorar las prestaciones de los sistemas actuales de Alcatel, su generalidad permitirá que se utilicen asimismo para optimizar los sistemas futuros.

Referencias

- 1 M. Villén Altamirano y B. Fontana: Models to Evaluate Response Times in Single-Processor Systems and Their Application to a Multiprocessor System: *Proceedings of the 12th International Teletraffic Congress*, 1988, Turín.
- 2 B. Fontana, M. Villén Altamirano y G.H. Petit: Modelos y herramientas para evaluar las prestaciones de tráfico de las centrales Sistema 12 RDSI: *Comunicaciones Eléctricas*, 1987, volumen 61, nº 1, págs. 104-109.
- 3 G. H. Petit y R. N. Andries: Performance Optimization in an M/G1 System Based on Priority Assignment Rules: *Proceedings of the 12th International Teletraffic Congress*, 1988, Turín.
- 4 L. Kleinrock: A Conservation Law for a Wide Class of Queuing Disciplines: *Naval Research Logistics Quarterly*, 1965, volumen 12, págs. 181-192.
- 5 W. Burakowski y M. Villén Altamirano: Queue Size Distributions in an M/D1 Queue with Non-Preemptive Priorities and Deterministic Feedback: *Proceedings of the international Seminar on Teletraffic Theory and Computer Modelling*, 1988, Sofía.

Manuel Villén Altamirano nació en Rute, España, en 1948. Se graduó ingeniero superior de telecomunicación en 1970 en la Universidad Politécnica de Madrid, y al año siguiente se incorporó al Centro de Investigación de Standard Eléctrica, trabajando en el grupo líder de estudios de tráfico de ITT. Ha trabajado en los estudios de tráfico de los sistemas de conmutación PENTACONTA*, METACONTA*, Sistema 12 y ECR 900, y ha participado en los proyectos RACE "telecomunicaciones móviles" y "estrategias de verificación". Actualmente dirige el grupo de estudios de tráfico. El Sr. Villén ha sido profesor de matemáticas en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación de Madrid y ha impartido seminarios sobre simulación a estudiantes de doctorado en la misma escuela.

Recientes logros en tecnologías de proceso de voz y sus aplicaciones

Dado que el habla es la forma más natural de comunicación humana, se ha puesto mucho interés en valerse de ella para comunicar con las máquinas, aunque la considerable potencia de proceso requerida haya dificultado tal logro. Sin embargo, los nuevos avances en tecnología de microprocesadores han permitido elaborar sistemas de reconocimiento y síntesis de voz para diversas aplicaciones en tiempo real.

M. Immendörfer

Centro de Investigación de Alcatel SEL, Stuttgart, República Federal de Alemania

E. Mumolo

Centro de Investigación de Alcatel FACE, Pomezia, Italia

Introducción

Los sistemas de oficinas y de proceso de información cada vez serán más importantes, tanto en el dominio público como en el privado. Por ahora, los usuarios sólo pueden acceder a estos sistemas a través de un teclado, y la información se presenta en pantalla o en impresora. Sin embargo, como la forma de comunicación más natural entre los seres humanos es el habla, ésta encierra grandes posibilidades para la comunicación hombre-máquina.

En los últimos años, las tecnologías de reconocimiento y síntesis de voz han hecho grandes progresos, resultado de los avances en tecnología VLSI y de los nuevos algoritmos para el proceso de voz. Ejemplo es un sistema universal multiprocesador de alto rendimiento destinado al reconocimiento de palabras aisladas y enlazadas*, codificación y síntesis de voz, desarrollado conjuntamente por los Centros de Investigación de Alcatel SEL y Alcatel FACE.

La capacidad de este sistema de reconocimiento de voz en tiempo real es de unas 1000 plantillas de referencia. Con el fin de conseguir este alto rendimiento, el equipo se concibió en torno a una pastilla LSI de ordenación de puertas diseñada a medida para reconocimiento de voz¹. El sistema puede operar tanto en modo dependiente como independiente del locutor, aunque en el último caso han de prepararse múltiples muestras para cada palabra, y por lo tanto se podrán reconocer de 100 a 300 palabras

en tiempo real con usuarios ocasionales (aquéllos en cuya voz no se haya adiestrado al sistema).

Para la síntesis de voz se aplican dos técnicas. La primera, utilizada para producir un número limitado de mensajes, consiste en una codificación estándar en la que los mensajes se forman grabando la voz del usuario y almacenando los datos digitales necesarios para generar el habla (coeficientes de los filtros, parámetros de excitación para el modelo de voz) en un medio soporte que permita su reproducción posterior. La segunda, por el contrario, produce un vocabulario ilimitado y utiliza un algoritmo texto-voz que convierte el texto escrito en salida acústica; esta técnica es adecuada para equipos de comunicación modernos en los que la entrada/salida de voz sirve eficazmente para la interacción hombre-máquina.

Enfoque teórico

En el sistema multiprocesador se han incorporado tres algoritmos básicos de proceso de voz: el reconocimiento de voz, la codificación de voz y la conversión de texto a voz. Puede hallarse más información sobre estas materias en anteriores números de *Comunicaciones Eléctricas*^{2,3,4}.

El algoritmo de reconocimiento de voz se basa en una deformación dinámica del tiempo (DTW) en una sola etapa^{5,6} para reconocimiento de palabras enlazadas, *aplicable también a palabras aisladas. En la primera etapa del proceso se extraen los vectores característicos (medidas seleccio-

* Véase glosario al final del artículo

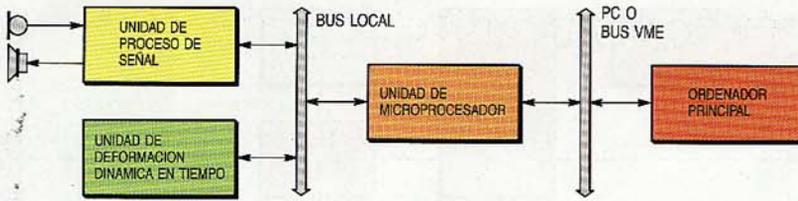


Figura 1
Sistema multi-procesador.

nadas) de la señal de voz entrante digitalizada. Se comparan luego dichos vectores con los patrones de voz de todas las plantillas de referencia, tomando como base la distancia Euclídea acumulada* entre las palabras desconocidas y dichas plantillas, calculada mediante deformación dinámica en el tiempo*. Al terminar una emisión vocal, se escoge como palabra reconocida la palabra de referencia con la menor distancia acumulada.

Para reconocer palabras enlazadas se ha de definir una sintaxis, y se ha elegido una sintaxis de estados finitos introducida por el usuario mediante un programa interactivo. Cuando se alcanza el nodo final de dicha sintaxis, se analizan todas las palabras almacenadas para seleccionar cuál es la frase más adecuada entre todas las que pueden formarse. Esta fase de selección se denomina retrotrazado, ya que comienza por la última palabra y termina por la primera, con análisis también basado en la mínima distancia acumulada entre las plantillas almacenadas y la locución desconocida. En este algoritmo, la detección del punto extremo viene marcada por la concordancia con las plantillas y se realiza simultáneamente con el reconocimiento, por lo cual éste es particularmente eficaz. El algoritmo utiliza además plantillas de silencio, con el fin de distinguirlo del habla. Se eligió DTW en una etapa porque ofrecía mejor comportamiento que cualquier otro algoritmo cuando se diseñó el sistema, y se adaptaba muy bien a la implantación en VLSI.

La independencia del locutor se consiguió utilizando múltiples patrones de referencia. Cada palabra del vocabulario se pronuncia por un gran número de usuarios, y se forman grupos por procedimientos de afinidad, tras lo cual cada grupo se identifica por una plantilla representativa.

Hay diversos algoritmos de análisis y de síntesis de voz, y la elección de uno en particular dependerá de la velocidad binaria y de las exigencias de calidad. Todos los algoritmos se han incorporado a un procesador digital de señal comercial. Para codificación de voz de alta calidad se utiliza MICDA (modulación por impulsos codificados diferencial adaptable) de 32 kbit/s. Otro algoritmo es un codificador de sub-bandas con cuantificador adaptativo de 16 kbit/s en el que la señal de entrada se

divide en ocho sub-bandas, codificadas individualmente según un plan dinámico de atribución de bits. Un tercer algoritmo es un codificador RELP (predicción lineal excitada por residual) de 8 kbit/s, en el que la LPC (codificación predictiva lineal) residual se pliega espectralmente.

Para síntesis de texto a voz⁷ se aplica la concatenación difónica*. Este método se ha utilizado con éxito en muchos idiomas diferentes, si bien para cada idioma se ha de realizar su propio análisis fonético y lingüístico para identificar el conjunto de difonos óptimo. Los difonos se extraen del habla natural mediante un programa de segmentación que identifica las partes estables de la voz. Este programa utiliza parámetros LPC particulares, las relaciones "log-área", para eliminar la energía y el tono fundamental de la voz. Los elementos difónicos se codifican luego a LPC y se almacenan. La conversión de texto a voz consta de dos partes principales: proceso lingüístico (segmentación de texto escrito en difonos y generación del contorno prosódico*), y síntesis de voz que se logra concatenando los difonos codificados.

Arquitectura del sistema

La figura 1 es un diagrama de bloques del sistema de proceso de voz de alta calidad que puede conectarse a un ordenador (sistema VME u ordenador personal) por un bus VME o PC. Esta conexión se utiliza para cargar en el ordenador datos, tales como plantillas de referencia y datos de síntesis de voz, y la programación desarrollada.

En cuanto a equipo, el sistema de proceso de voz comprende tres grandes unidades funcionales: una placa de entrada para el proceso digital de señal, una placa DTW para la comparación rápida de plantillas, y un microprocesador para control del sistema. Estas tres unidades comparten un bus local especialmente diseñado para intercambio rápido de datos.

El equipo físico del sistema fue diseñado conjuntamente por Alcatel FACE, responsable de la versión PC, y SEL que se encargó de la versión VME.

Placa de entrada para proceso digital de señal

La figura 2 es un diagrama de bloques de la placa de proceso digital cuyos principales elementos son un codec para filtrado analógico paso banda y conversión analógico/digital de la señal de audio, un procesador digital de señal (DSP) TMS32010, y una memoria compartida para intercambio

* Véase glosario al final del artículo

rápido de datos entre DSP y microprocesador.

La señal analógica se muestrea a 8 kHz y se digitaliza por un codec MIC comercial para obtener muestras log-codificadas que se transforman a escala lineal de 12 bits por una tabla de búsqueda en el DSP. Puede haber también señales de voz digitales (en sistemas de conmutación y transmisión digital). Para el reconocimiento de voz, el DSP calcula las densidades de energía en cortos periodos mediante un banco de filtros digitales y los transforma al dominio cepstral en mels*. Los coeficientes cepstrales se transfieren al microprocesador y a la placa DTW para comparar con las secuencias de los vectores de referencia. En la síntesis de voz, se introduce por programación en el DSP un filtro digital que genera muestras de voz digitalizada a partir de un juego de parámetros almacenados para reproducción.

La unidad DTW

El elemento clave en el sistema de reconocimiento, que aporta la alta velocidad de intercambio requerida para vocabularios de hasta 1000 palabras, es el circuito integrado DTW, que se fabrica como ordenación de puertas CMOS de 2 µm en célula estándar de consumo cercano a 100 mW.

La unidad DTW (Fig. 3) se puede considerar como un periférico inteligente, conectado a la CPU (unidad central de proceso) de uso general que controla el funcionamiento de la pastilla. Para comparar patrones en el reconocimiento de voz, la pastilla realiza el cálculo de la distancia euclídea y determina la vía DTW.

Antes de comenzar un proceso DTW, la CPU carga los datos completos de las plantillas en la memoria del DTW e inicializa la zona de memoria reutilizable para recibir resultados intermedios de la computación de distancia acumulada. Cada vector de plantilla de referencia consta de 10 componentes de cuatro bits (nueve coeficientes cepstrales y uno del valor de la energía). La CPU pasa cada nuevo vector de trama de la expresión desconocida a la pastilla DTW, que calcula la distancia a todas las tramas de plantillas del vocabulario en una columna. Después, para cada trama de referencia, la distancia acumulada se determina a partir del valor real y de la distancia previamente acumulada, leída en la zona reutilizable de la memoria DTW; estas distancias acumuladas sirven para actualizar dicha zona. Al final de la entrada desconocida, se seleccionan como expresiones reconocidas la palabra o palabras con mínima distancia acumulada.

* Véase glosario al final del artículo

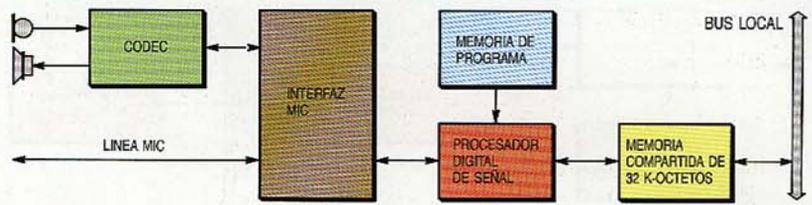


Figura 2
Unidad de procesador de señal.

Para lograr una alta capacidad de proceso, la pastilla DTW opera en modo de solape ("pipeline"), calculando los valores de la distancia y computando la vía DTW en paralelo para las tramas n y n + 1.

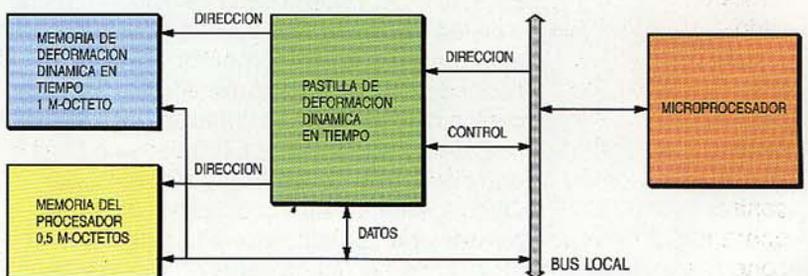
La velocidad de proceso en el cálculo de la distancia se optimiza por el uso de circuitos paralelos. Siendo de 40 MHz la frecuencia de reloj de la pastilla, el ciclo básico DTW para procesar una trama de plantilla tendrá 450 ns. Con una longitud media de 40 tramas por palabra (duración de trama 20 ms), se pueden procesar unas 1000 plantillas en tiempo real. Almacenando en memoria tampón las tramas entrantes desconocidas, el proceso por la pastilla puede ir retrasado con respecto a la trama que entra, recuperando tiempo si han de procesarse menos muestras en el siguiente nodo.

La pastilla DTW puede direccionar hasta 1 M-octeto de memoria, almacenando las plantillas de referencia del vocabulario y los datos reutilizables para resultados intermedios. Esta memoria puede contener un total de 2500 plantillas. En un proceso en tiempo real, se pueden atribuir de modo dinámico plantillas de referencia para un máximo de 1000 palabras (a varias por palabra con reconocimiento independiente del locutor), de acuerdo con la sintaxis definida por el usuario para una aplicación concreta.

Unidad del microprocesador

La CPU consiste en un microprocesador de 16 bit estándar que opera a 10 MHz. La placa incluye también memoria de datos y de programa, así como un circuito de interfaz con el bus VME o PC. En la realización actual, el microprocesador puede direccionar hasta 512 k-octetos de memoria. Las tareas básicas a realizar por la CPU son:

Figura 3
Unidad DTW.



- autocarga del sistema
- inicialización y arranque del procesador de señal en la placa de entrada y del circuito integrado DTW
- intercambio y gestión de datos entre la unidad de entrada y la DTW
- carga/descarga en/desde el ordenador principal de las plantillas de referencia o datos para la síntesis.

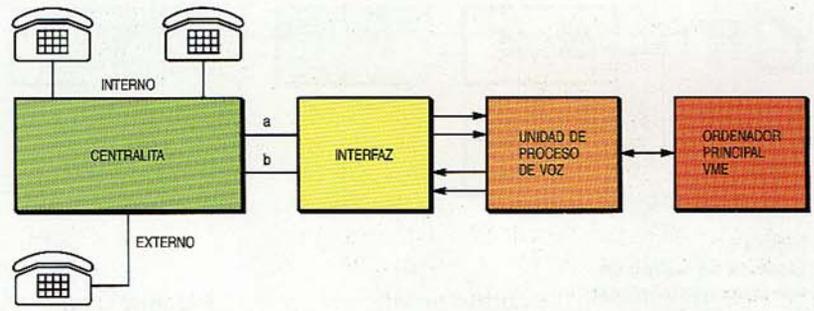


Figura 4
Consola de operador telefónico controlada por voz.

Programa para el sistema de proceso de voz

La programación del multiprocesador se puede dividir en dos grandes partes: programas de reconocimiento y síntesis de voz y programas de aplicación. El algoritmo antes descrito de reconocimiento de voz independiente del locutor se materializó y demostró para proceso en tiempo real. Los datos para plantillas independientes del locutor, generados por el método de agrupamiento, se cargaron desde el ordenador principal al sistema de reconocimiento. Los programas del procesador de señal se realizaron en ensamblador TMS, y en lenguajes C y ensamblador los del microprocesador. Los programas de control y aplicación están escritos en C, con las rutinas críticas en tiempo (la comunicación con el procesador y la pastilla DTW) desarrolladas en ensamblador. En Alcatel SEL se elaboraron los programas de reconocimiento de voz, mientras que los de aplicación fueron producidos por ambos Centros de Investigación.

Los programas de proceso lingüístico y síntesis de voz para conversión de texto a voz están realizados en C en el microprocesador, y en ensamblador en el procesador de señal comercial. Alcatel FACE preparó los programas para conversión de texto a voz en idioma italiano.

Aplicación a comunicaciones de oficina

El sistema multiprocesador de alto rendimiento ha servido para demostrar las ventajas del equipo de entrada/salida de voz en servicios modernos de comunicación de oficinas. Las aplicaciones incluyen un operador telefónico automático de control oral y un sistema de correo de voz también activado oralmente, desarrollados ambos por Alcatel SEL así como una clasificadora oral y un sistema de comunicación telefónico para sordos/ciegos que ha preparado el Centro de Investigación de Alcatel FACE.

La figura 4 presenta un sistema para el control oral de una función de consola de operador. El sistema de proceso de voz, conectado a la consola por un interfaz de

2/4 hilos, está gobernado por un programa que se ejecuta en ordenador VME. Sus principales características son la entrada oral para "marcar" pronunciando nombres y acceder mediante órdenes habladas a servicios de la centralita, y la salida oral para ayuda al usuario y reproducción de mensajes telefónicos.

Cuando se llama al operador telefónico automático, el sistema pide al usuario que diga el nombre del abonado llamado. Tras la confirmación "hablada" del nombre reconocido, el sistema lo convierte en tonos multifrecuencia para la centralita. Si el abonado llamado está ocupado o no es accesible, el llamante puede dejar un mensaje en el sistema de proceso de voz, el cual será ofrecido al usuario llamado de un modo automático y repetitivo, a intervalos de tiempo programables, hasta que responda. Es también posible la difusión automática de mensajes orales a una lista de abonados. Por ahora, el sistema de reconocimiento independiente del locutor comprende un total de 40 nombres y órdenes, y según sea la capacidad de reconocimiento en tiempo real podrá este vocabulario ampliarse hasta 300 nombres y órdenes.

En otra aplicación, el correo de voz (Fig. 5), se utiliza la unidad de proceso de voz para el control oral, en lugar de valerse de un teclado multifrecuencia. Para ello se conecta el micrófono del teléfono a la entrada de la unidad de reconocimiento. El funcionamiento consiste en convertir las órdenes – reconocidas a partir de palabras aisladas o en secuencia – a caracteres de control ASCII, que se transmiten por enlace serie a un generador multifrecuencia y se transforman en los tonos apropiados para el control del correo de voz. Según sea la localización del sistema, estas señales multifrecuencia se transmiten por línea local o de larga distancia. La principal ventaja del reconocimiento de voz en esta aplicación es la facilidad de asignar una orden oral (o una serie de ellas) a una secuencia de pulsaciones de tecla que controlan el funcionamiento del sistema, por ejemplo para la grabación, reproducción, envío y borrado de mensajes de

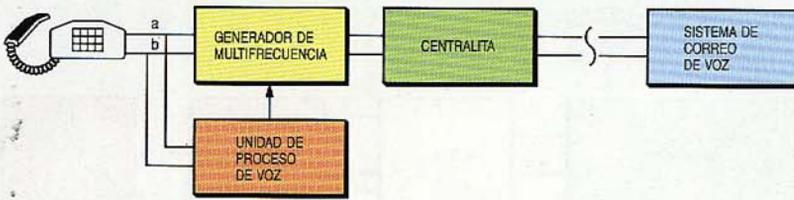


Figura 5
Sistema de correo de voz de activación oral.

correo de voz, activación de la función de ayuda, y generación de una lista de direcciones. Inicialmente se han introducido en el sistema 60 nombres y órdenes para reconocimiento de palabras enlazadas independiente del locutor.

La figura 6 es un diagrama de bloques de una máquina clasificadora activada por voz diseñada para una sala de distribución en correos. La entrada oral sustituye al método tradicional de teclear los códigos de destino desde una consola o emplear códigos ópticos de barras. El operador se comunica

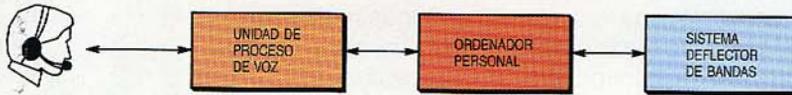
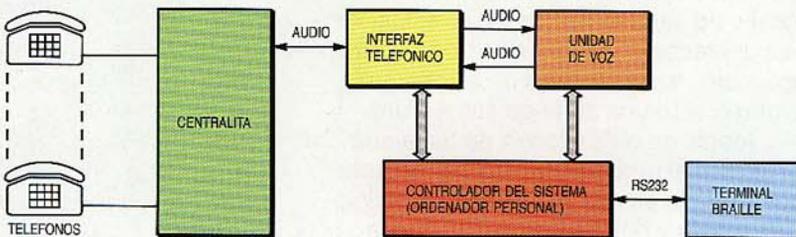


Figura 6
Máquina clasificadora activada por voz.

en este caso con el sistema a través de un micrófono o casco sujeto a la cabeza, que le deja libertad de movimientos para coger un paquete, leer la dirección de destino y colocarlo cerca de la cinta transportadora. Un detector óptico advierte entonces la presencia del paquete, y el sistema pide al operador que diga el nombre del destino, tras lo cual le contesta con un mensaje sintetizado que repite ese mismo destino con el fin de que pueda comprobar su correcto reconocimiento y dar una orden de "confirmar" o "anular". Si el destino no se hubiera reconocido bien, se repetiría el proceso. Este sistema permite clasificar más de 1000 objetos por hora, y se ha probado con 40 nombres de destino para reconocimiento de palabras separadas independiente del locutor.

Se han utilizado estas tecnologías para desarrollar un sistema (Fig. 7) que permite a personas incapacitadas comunicarse por

Figura 7
Sistema de ayuda a la comunicación para personas impedidas.



teléfono⁸. Los sordos y los ciegos pueden comunicarse mediante un terminal Braille especializado con personas que utilizan un teléfono normal. Los mensajes introducidos por Braille se convierten en voz, para que los escuche normalmente el teléfono distante. La respuesta hablada la convierte en texto el reconecedor de voz y, tras ser codificada en Braille, es reproducida en una pantalla táctil. La llamada telefónica se inicia introduciendo un código por el terminal Braille.

La persona impedida puede recibir también llamadas de un modo táctil por medio de un equipo de radiobúsqueda portátil conectado al sistema, tras lo cual puede utilizar el terminal Braille para responder. Se ha cargado en el sistema un vocabulario de 60 plantillas independientes del locutor, con palabras que abarcan tres clases principales de comunicación: llamadas urgentes y de emergencia, peticiones concretas, y acuerdos o citas.

Han comenzado recientemente unas pruebas de campo para evaluar la tasa de reconocimiento y la ergonomía del sistema, que determinarán su aceptación por los usuarios. En un anterior estudio, el sistema consiguió un 98,7 % de reconocimiento dependiente del locutor, utilizando una base ampliada de datos de voz para reconocimiento de palabras aisladas.

Conclusiones

El progreso en la tecnología de semiconductores ha posibilitado el uso de microprocesadores de alto rendimiento, procesadores digitales de señal y circuitos integrados especializados para ejecutar complejos algoritmos de proceso de voz. Al mismo tiempo, las superiores potencias de computación permiten realizar algoritmos más refinados y precisos. Alcatel ha desarrollado un sistema multiprocesador de alta prestación capaz de efectuar algoritmos de reconocimiento de voz en tiempo real con amplio vocabulario, análisis y síntesis de voz, y conversión de texto a voz. Su potencia y flexibilidad han servido para implantar la tecnología de proceso de voz en una serie de aplicaciones prácticas.

Glosario de términos

Reconocimiento de palabras aisladas: se refiere a palabras separadas por pausas, mientras que en el de palabras enlazadas las frases se pronuncian sin hacer pausas entre palabras, pero con sintaxis reducida (en contraste con el reconocimiento de voz continua).

Distancia Euclídea acumulada: los dos patrones a comparar se dividen en tramas, y su diferencia se basa en todas las distancias de trama a trama entre ambos. En este caso, las distancias son Euclídeas (suma de los cuadrados de las diferencias entre los componentes de los vectores característicos). Las distancias trama a trama se acumulan a lo largo de la vía de deformación del tiempo, tomando la última distancia acumulada como medida de la disparidad entre los dos patrones.

Deformación en el tiempo: denota la deformación de un patrón de voz sobre otro de acuerdo con un mapa de distorsión en el tiempo entre ambos patrones. Este mapa se denomina vía de deformación temporal.

Concatenación difónica: se llama difono a un segmento de voz que comienza en el centro en régimen estable de un "fono" (sonido sintetizado del lenguaje) y termina en el centro del "fono" siguiente. Todas las palabras posibles de un lenguaje se pueden generar concatenando difonos.

Contorno prosódico: se refiere a la entonación de una frase. En el sistema de Alcatel, la entonación modifica el contorno de la frecuencia fundamental con arreglo a la puntuación.

Mel: escala no lineal (logarítmica) para la frecuencia que se corresponde con la sensibilidad del oído. El cepstrum es el espectro inverso del logaritmo del espectro de potencia de la señal.

Referencias

- 1 M. Immendörfer, D. Kopp y H. Hackbarth: A High Performance Multiprocessor System for Speech

- Processing Applications: *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, 1988, volumen IV, págs. 2096-2099, Nueva York.
- 2 H. Mulla y J. F. Vaughan: Aplicación del reconocimiento y la síntesis de voz a los servicios de las PABX: *Comunicaciones Eléctricas*, 1985, volumen 59, n° 3, págs. 273-280.
 - 3 M. Immendörfer: Marcador telefónico activado por la voz: *Comunicaciones Eléctricas*, 1985, volumen 59, n° 3, págs. 281-285.
 - 4 M. Immendörfer: Aplicaciones del proceso de voz a equipos de telecomunicación y oficinas: *Comunicaciones Eléctricas*, 1986, volumen 60, n° 1, págs. 71-78.
 - 5 J. S. Bridle y M.D. Brown: Connected Word Recognition Using Whole Word Templates: *Proceedings of the Institute of Acoustics Autumn Conference*, noviembre 1979, págs. 25-28.
 - 6 H. Ney: The Use of a One-Stage Dynamic Programming Algorithm for Connected Word Recognition: *IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing*, volumen ASSP-32, n° 2, págs. 263-271.
 - 7 P. Pierucci, E. Mumolo y C. Labonia: Multichannel Text-to-Speech System for Electronic Mail Applications: *Proceedings of the European Conference on Speech Technology*, septiembre 1987, págs. 264-267.
 - 8 M. Bazzani y E. Mumolo: PC-Based Telephone Communication System for Deaf-Blind People: *Proceedings of IEEE Globecom '88*, 1988, págs. 43-47.

Manfred Immendörfer nació en Stuttgart, Alemania, en 1941. Se graduó Dipl. Phys. por la Universidad Técnica de dicha ciudad en 1968, y Dr.rer.nat en 1973, por su trabajo sobre relajación acústica en polímeros. En 1973 ingresó en el Centro de Investigación de Alcatel SEL como ingeniero de planificación de sistemas, trabajando en el campo del proceso de voz. El Dr. Immendörfer dirige actualmente el departamento de proceso digital de la voz en el citado Centro de Investigación.

Enzo Mumolo nació en Udine, Italia, en 1956. En 1982 se doctoró en ingeniería eléctrica por la Universidad de Trieste, Italia. Desde 1982 a 1984 trabajó en esta Universidad, dirigiendo la investigación sobre algoritmos de modelación de voz, antes de incorporarse al Centro de Investigación de Alcatel FACE en 1984. El Dr. Mumolo es ahora el responsable de las actividades del departamento de proceso de voz en el citado Centro.

Familia de codificadores de vídeo para redes STM y ATM

La codificación de los servicios de vídeo es importante para el desarrollo de las futuras redes de banda ancha. Está en estudio una familia de codecs de vídeo para una extensa gama de aplicaciones a velocidades que van desde 140 Mbit/s hasta 64 kbit/s, para redes síncronas (STM) y asíncronas (ATM).

R. Heiss

Alcatel SEL, Stuttgart, República Federal de Alemania

A. Rousseau

Alcatel-CIT, Lannion, Francia

W. Verbiest

Alcatel Bell Telephone, Amberes, Bélgica

Introducción

En los diez años últimos se han hecho progresos notables en el desarrollo de las redes digitales de banda ancha. Se han propuesto, estudiado y/o realizado muchas arquitecturas, a veces fundamentalmente diferentes. Sin embargo, toda red de banda ancha necesita ofrecer servicios de vídeo para aplicaciones que abarcan desde la vigilancia de baja calidad hasta el intercambio de material fuente para TVAD (televisión de alta definición), o desde la videoconferencia interactiva hasta la distribución a gran escala de centenares de canales de TV.

Para todas estas aplicaciones se necesitan codecs de vídeo que hagan de interfaz

de las pantallas y fuentes de vídeo analógicas o digitales con las redes digitales. También puede ser preciso reducir la velocidad binaria, dependiendo de la organización de la red y de su anchura de banda. Se ha alcanzado un compromiso entre el coste de la anchura de banda en la red y el de procesar la señal digital en los terminales. Sin embargo, como ambos costes están bajando muy aprisa, es difícil predecir la evolución futura.

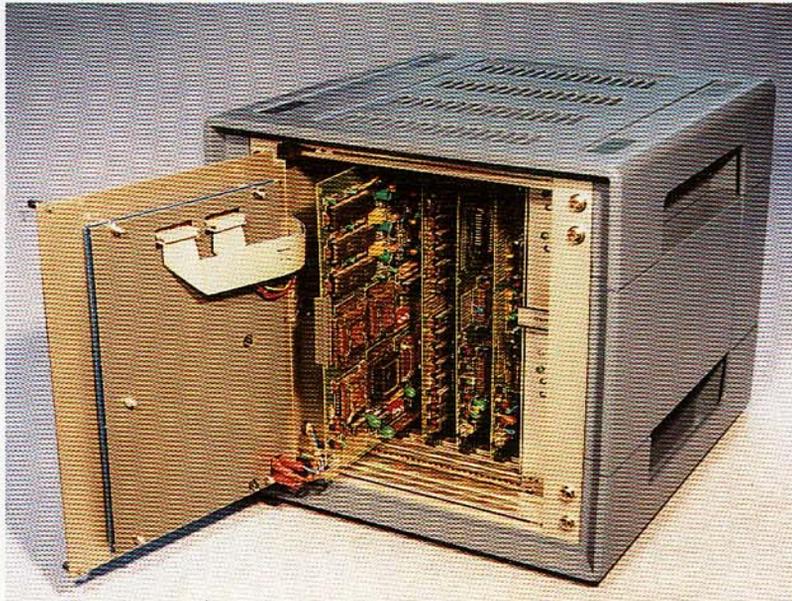
Debido a las limitaciones de las RDSI de banda estrecha, se trabaja ahora intensamente — dentro de la Comisión de Estudio XV del CCITT, por ejemplo — en el desarrollo de eficaces técnicas de compresión a baja velocidad binaria. Es probable que estos primeros productos tengan gran influencia sobre los desarrollos venideros.

En Alcatel se están estudiando técnicas de codificación de señales de vídeo en altas y bajas velocidades binarias, así como el efecto del ATM (modo de transferencia asíncrono) sobre la codificación de los servicios de vídeo.

Codificación a alta velocidad (140 Mbit/s)

La Recomendación 601 del CCIR¹ fijó una norma internacional sobre codificación de parámetros para los estudios de televisión y el intercambio internacional de emisiones. Estos parámetros conducen a una velocidad global de datos de 216 Mbit/s, alcanzándose así una calidad mayor que con las actuales normas de TV. En particular, la nueva norma elimina la diafonía entre los canales de luminancia y de crominancia, ofrece una anchura de banda analógica

Codec de vídeo y audio de 140 Mbit/s para señales componentes de vídeo (prototipo con elementos normalizados y ordenación de puertas).



mejorada (particularmente para las señales de crominancia) y asegura la ausencia de ruido adicional debido al proceso analógico.

Se necesita aplicar técnicas de compresión de datos para transmitir esta señal de vídeo de alta calidad. Es posible conseguir velocidades de transmisión que van desde 140 Mbit/s hasta 30 Mbit/s sin pérdidas de calidad, pero la complejidad de los algoritmos, y por tanto la del equipo físico, aumenta sustancialmente en línea con el factor de reducción. Al mismo tiempo crece también la susceptibilidad a los errores de transmisión, lo que obliga a introducir una protección contra ellos.

Para transmitir una señal de vídeo de alta calidad, que cumpla la CCIR 601, por el canal H4 de la jerarquía MIC, se necesita reducir la velocidad de datos alrededor del 38%. La velocidad más probable para este canal será de 135,168 Mbit/s. En una primera etapa se eliminan los intervalos de supresión horizontales y se alargan los intervalos activos de línea. En el seno del CCITT/CMTT se han analizado tres métodos para una mayor reducción de la velocidad².

Reducción de la resolución horizontal de crominancia

La anchura de banda de ambas señales de crominancia se reduce a la mitad, con todos los pixels codificados en MIC. Además de la simplicidad del equipo físico, esta técnica tiene la ventaja de que un error de transmisión afecta solamente a un pixel y no se propaga. Por otra parte, algunas veces se nota la menor resolución de crominancia. La calidad global es ligeramente más baja que la original señalada en la CCIR 601, pero todavía mucho mejor que la de la TV actual.

Reducción de la resolución vertical de crominancia

Las señales de crominancia se transmiten secuencialmente en línea, codificándose en MIC todos los pixels, de lo que resulta una reducción vertical en la resolución de crominancia. Los filtros tridimensionales son esenciales para conseguir una alta calidad en la realización de esta técnica, ya que al menos se necesita una memoria de tramas. El equipo físico es más complejo que en el método de reducción horizontal de crominancia, dado que se requieren filtros adicionales y almacenamiento de tramas. Sin embargo, la calidad de imagen probablemente será un poco mejor, si bien ello se percibirá sólo en escenas críticas.

Codificación MICD

Se están analizando métodos MICD (modulación de impulsos codificados diferencial)

de dos y tres dimensiones para reducción de la velocidad. Comparado con los dos métodos precedentes, esto requiere al menos una memoria de línea o de trama adicional. La ventaja de este método es que puede transmitir toda la resolución que marca la CCIR 601 sin introducir perturbaciones, ya que todos los defectos de cuantificación caen por debajo del umbral de perceptibilidad. No obstante, tiene el inconveniente de que pueden propagarse errores de reconstrucción causados por defectos de transmisión, perturbando parte de la imagen.

Transmisión de vídeo a 140 Mbit/s

Hay dos métodos de codificación que parecen ventajosos para la transmisión de las señales de vídeo a 140 Mbit/s:

- Codificación MIC con menor resolución horizontal de crominancia, que comporta circuitos relativamente sencillos y es insensible a los errores de transmisión, siendo por tanto adecuada para todas las aplicaciones pero sólo como solución provisional para las conexiones entre estudios y las aplicaciones de difusión. Alcatel SEL dispone ya de prototipos, que han sido instalados para las pruebas de campo de banda ancha BERKOM en Berlín.
- Codificación MICD con toda la resolución dada en CCIR 601, a largo plazo la solución adecuada, aunque más compleja, para todas las aplicaciones. Esta codificación probablemente se normalizará en el futuro próximo.

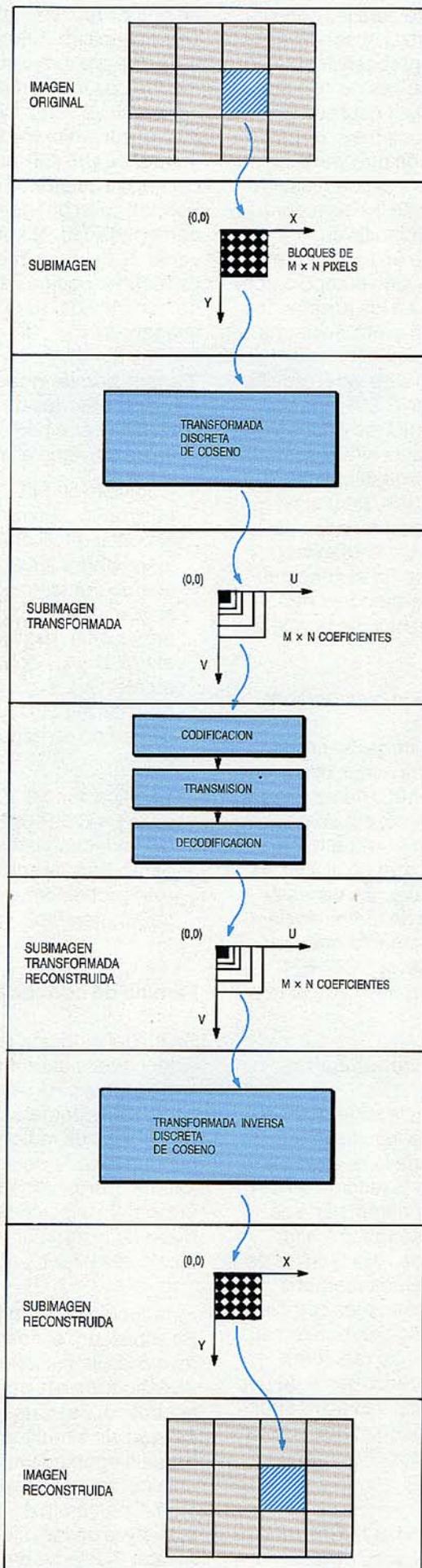
Familia de codecs basados en DCT

Se ha definido una familia completa de videocodecs utilizando el mismo núcleo de codificación para velocidades desde 64 kbit/s (videoteléfono) hasta 34 Mbit/s (emisiones de radiodifusión de TV). Aunque quedan todavía decisiones por tomar, parece que la normalización internacional favorecerá a los codecs por DCT (transformada de coseno discreta), ya que esta técnica es eficaz y atractiva.

Simulación de sistemas de vídeo digital

En el pasado, el desarrollo de los codecs reveló las limitaciones de las técnicas de investigación a la hora de obtener un equipo adecuado. En consecuencia, se comprendió que sin simulación no podría emprenderse ningún nuevo desarrollo basado en un algoritmo de mayor relación de compresión. Con objeto de facilitar la evaluación y el análisis de los diferentes algoritmos, en Alcatel CIT se ha preparado un sistema de

Figura 1
Principios de codificación de transformación.



simulación, en torno a un miniordenador con sistema de videodisco digital, que consta principalmente de un disco magnético en paralelo de alta velocidad de transferencia y un conversor digital-analógico de vídeo para la restitución en tiempo real de secuencias pregrabadas de vídeo digital de hasta 30 segundos. Para reducir el tiempo de simulación se utiliza una estación de trabajo de 4 Mips como servidor de proceso.

Codificación DCT

Consiste esta técnica a (Fig. 1) en una transformación ortogonal discreta para convertir un conjunto de N valores de la señal a codificar (elementos de imagen o pixels, en este caso) en N coeficientes, que luego se cuantifican y codifican. La elección de una transformación adecuada a las propiedades estadísticas de la señal de entrada permite obtener coeficientes idóneos para cuantificación y codificación (es decir, pocos coeficientes con valores significativos). La DCT se considera generalmente similar a la transformación óptima Karhunen-Loeve, y se adapta bien a la codificación de imagen. Se comporta como transformación bidimensional aplicada a bloques de $N \times M$ pixels, y produce conjuntos de $N \times M$ coeficientes con valores apreciables concentrados en las "frecuencias bajas". El uso de leyes de cuantificación óptimas, de una adecuada exploración y de codificación de longitud variable permite reducir mucho la cantidad de información a transmitir. La DCT es eficaz en el modo "intratrama" (teniendo en cuenta solamente el bloque actual), y también puede utilizarse en modo "intertrama" (la transformación se aplica a la diferencia entre bloques de la trama actual y de la anterior). La figura 2 presenta el diagrama de bloques de un codificador DCT.

Codec de 384 kbit/s

Este codec utiliza una codificación por transformada con compensación del movimiento que se basa en la posibilidad de obtener aproximaciones locales al movimiento de los objetos en las tramas de vídeo mediante traslaciones. Así, cada bloque de pixels de la trama actual se compara con los contiguos de la trama anterior utilizando técnicas de concordancia de bloques; si se detecta una posición de concordancia, se transmite el vector de movimiento y sólo se transforma y codifica el bloque diferencia residual. Se han realizado simulaciones de este codec y construido un prototipo del mismo.

Las características principales del algoritmo para el codec de 384 kbit/s son:

- Utiliza CIF (formato intermedio común): resolución espacial de 352 pixels por

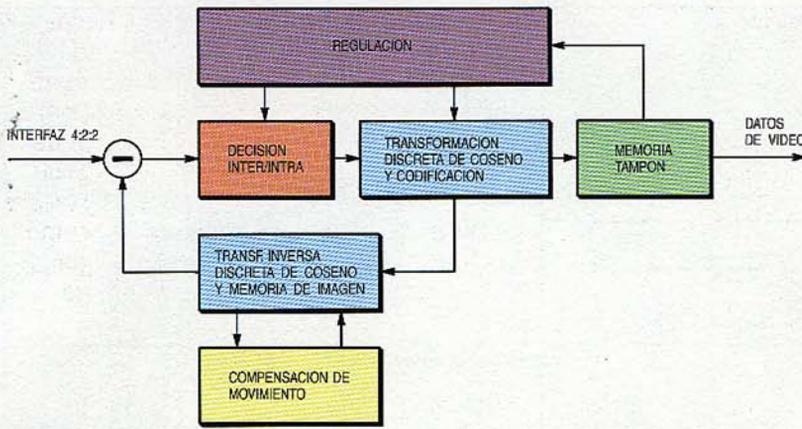


Figura 2
Diagrama de bloques de un codificador de transformada de coseno discreta.

288 líneas para luminancia y 176 pixels por 144 líneas para crominancia, con resolución temporal máxima de 30 Hz.

- Tamaño de bloque de 8 x 8 para codificación DCT.
- Compensación de movimiento con área de búsqueda de + 7 pixels, ± 7 líneas.

Se adopta el concepto de macrobloque para transmisión: Y (4 x 8 x 8) U (8 x 8) V (8 x 8).

un cuarto del anterior, con 176 pixels por 144 líneas para luminancia, y 88 pixels por 72 líneas para crominancia.

- Tamaño de bloque de 8 x 8 para codificación DCT.
- Compensación de movimiento con área de búsqueda de ± 7 pixels, ± 7 líneas.

En la transmisión se aplica el concepto de macrobloque. Se han realizado simulaciones completas a 48, 64 y 96 kbit/s. La figura 4 muestra el diagrama de bloques de un codec de 64 kbit/s. Los codecs de 64 y 384 kbit/s utilizan partes comunes para conseguir sistemas de videoconferencia modulares y flexibles.

Codecs de 34 Mbit/s

Las normas internacionales para la transmisión de imágenes de TV de calidad están en debate, y podría adoptarse una decisión antes de terminar el actual periodo de estudio del CCIR. La codificación DCT es tan atractiva como las técnicas MICDA (modulación por impulsos codificados diferencial adaptable), y probablemente más eficaz a

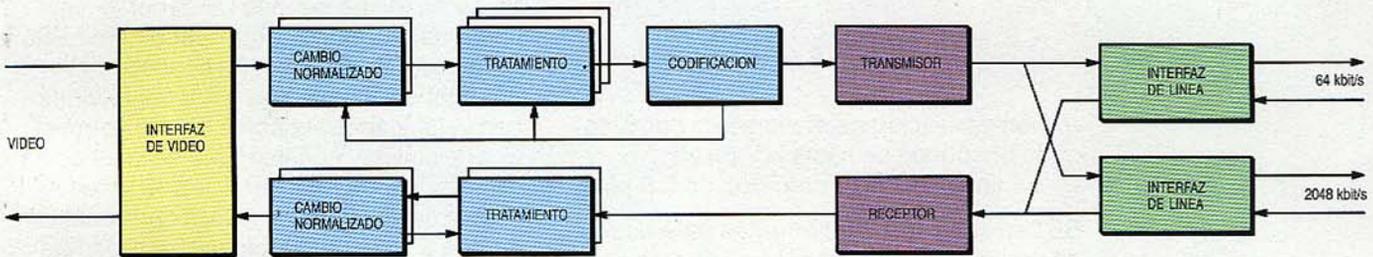


Figura 3
Diagrama de bloques de un codec de 384 (128 a 2048 kbit/s).

La figura 3 es un diagrama de bloques de un codec de 384 kbit/s.

Codec de 64 kbit/s

Actualmente se están introduciendo en el CCITT las especificaciones de codificación a 64 kbit/s. Las principales características de estos codecs son:

- Preproceso: 352 pixels por 288 líneas para luminancia, y 176 pixels por 144 líneas para crominancia. Máxima frecuencia de trama, 15 Hz. Como alternativa, un CIF a

velocidades binarias inferiores (p.ej., 17 Mbit/s).

Las principales características de los codecs basados en DCT son:

- Entrada/salida de vídeo: señal RGB analógica con 525 ó 625 líneas.
- Preproceso: relación 4 : 2 : 2 de la Recomendación 601 del CCIR. En una resolución espacial de 625 líneas hay 720 pixels x 576 líneas para luminancia y 360 pixels x 576 líneas para crominancia, mientras que en una resolución

Figura 4
Diagrama de bloques de un codec de 64 (56 a 128 kbit/s).

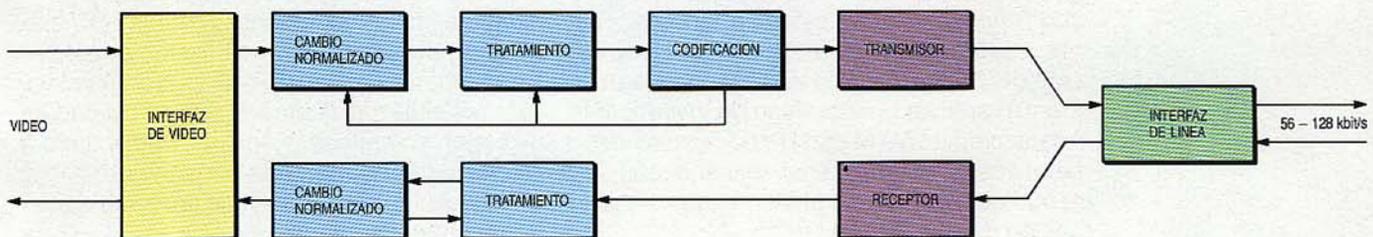
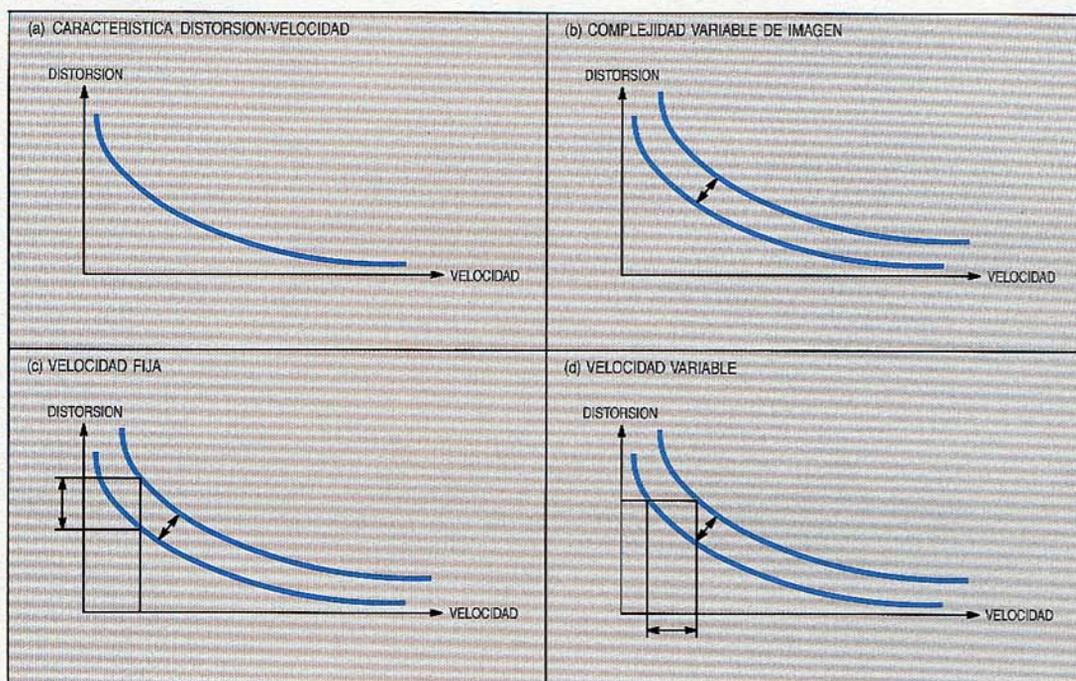


Figura 5
Características distorsión-velocidad para codificación de velocidad, fija y variable.



espacial de 525 líneas hay 720 píxels \times 488 líneas para luminancia y 360 píxels \times 488 líneas para crominancia.

- Tamaño de bloque, 8×8 para codificación DCT.
- Compensación de movimiento con área de búsqueda de hasta ± 7 píxels, ± 7 líneas con una precisión de 0,5 píxel.

Se han simulado los diferentes parámetros de regulación, con una técnica muy atractiva.

De igual modo que para los codecs de baja velocidad, puede definirse una familia de codecs basada en los mismos principios de codificación. En ella se incluyen codecs de 34 Mbit/s con compensación de movimiento para redes de transporte interior de estudio y primarias, y sin compensación de movimiento (codificación intratrama) para redes de distribución, junto a codecs de 17 Mbit/s con compensación de movimiento para redes de distribución.

Codificación de vídeo en redes ATM

Hasta hace muy poco la investigación sobre codificación de vídeo estaba orientada hacia aplicaciones de red síncrona. La aparición del ATM (modo de transferencia asíncrono)³ suscitó la necesidad de investigar la interacción del ATM con la codificación de servicios de vídeo, lo cual se viene realizando desde 1985 en el Centro de Investigación de Alcatel Bell.

Nuevas oportunidades

Una característica atractiva de las redes ATM es la ausencia de una estructura física de canal, lo que permite utilizar una gama continua de velocidades, desde cero hasta el límite físico de la red. En consecuencia, el ATM debe ser capaz de tratar conexiones con velocidades variables. Existe además una flexibilidad considerable en la elección de velocidades para servicios de vídeo.

Esta flexibilidad conlleva la oportunidad de que el usuario introduzca la calidad de imagen que él mismo elija, con velocidades binarias que dependen del algoritmo de codificación y de la complejidad instantánea en el tiempo.

La figura 5a muestra la forma típica de la función de distorsión-velocidad para un algoritmo de codificación y una complejidad de imagen dados. En el caso de secuencias de vídeo con pleno movimiento, la complejidad de imagen varía con el tiempo, y la función de distorsión-velocidad se desplaza como se indica en la figura 5b. Si se necesita una velocidad fija, las variaciones de complejidad darán lugar a una calidad de imagen variable (figura 5c), especialmente a velocidades bajas. Estas variaciones afectan notablemente a la calidad subjetiva de la imagen. Puede conseguirse una calidad de imagen constante (y subjetivamente mejor) si se utiliza la codificación a velocidad binaria variable, VBV (Fig. 5d). A velocidades altas, las fluctuaciones de calidad de imagen son mínimas, incluso codificando a velocidad fija, pudiendo conseguirse con la codificación VBV aumentos apreciables en la anchura de banda.

Se ha desarrollado y conectado a una red ATM un modelo de laboratorio de video-codec VBV que utiliza el algoritmo de codificación MICD, y en el que se alcanzan velocidades desde unos pocos Mbit/s hasta 40 Mbit/s, correspondientes a distintas calidades de imagen. La investigación se está ahora concentrando en los algoritmos de codificación VBV que permiten elegir, dentro de un amplio margen, la calidad de imagen (y la velocidad), y se adaptan de manera óptima a las variaciones de complejidad instantáneas. Para lograr este objetivo⁴, se desarrollarán métodos VBV adecuados de atribución de anchura de banda en la red ATM.

Nuevos defectos

Por desgracia, las ventajas del ATM tienen un precio. En efecto, la división asíncrona de tiempo origina un importante defecto nuevo: la pérdida de células. Aunque los valores de diseño para las probabilidades de pérdida de células son sumamente bajos (10^{-8} extremo a extremo), la naturaleza del daño causado por la pérdida de células es tal que no puede despreciarse en aplicaciones de vídeo de alta velocidad.

Como todas las células que siguen a una célula perdida se interpretan erróneamente, se pierde la sincronización. En servicios de vídeo de 140 Mbit/s y con longitud de célula de 32 octetos, el periodo medio entre pérdida de células es sólo de unos 3 minutos, lo que obliga a proteger la sincronización contra dicha pérdida, tal vez introduciendo una numeración secuencial de células.

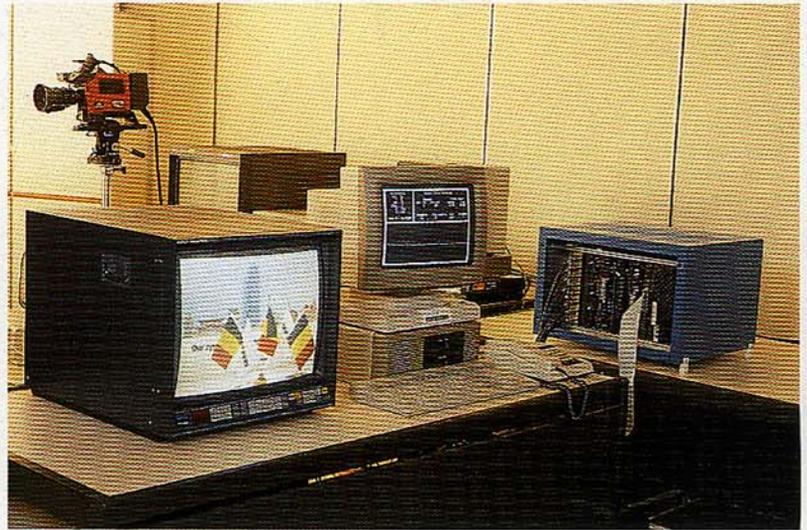
El otro defecto es un gran error impulsivo (256 borrados consecutivos). La degradación resultante en la imagen depende del algoritmo de codificación aplicado, siendo especialmente sensibles a este defecto los que utilizan códigos de longitud variable. La información perdida puede reconstruirse si se aplica la corrección de errores sin canal de retorno, aunque a costa de cierto exceso en anchura de banda y de una mayor complejidad de la realización. Otra posibilidad es reemplazar la información perdida con otra ya disponible en el lado del decodificador y que se le asemeje mucho: sustitución por la línea anterior, por la trama anterior, o por un componente de menor resolución. La investigación actual se concentra en las técnicas jerárquicas de encubrimiento de pérdida de células: el tratamiento del error se adapta a la importancia relativa de la célula.

Nuevas técnicas de interfaz

El interfaz de un video-codec con una red ATM es fundamentalmente diferente del

que tiene con una red STM. En la red ATM, el codificador de vídeo agrupa la información codificada en células discretas que se transportan independientemente por la red. En el lado receptor, el decodificador de vídeo debe extraer la información de dichas células a la velocidad correcta y reconstruir las imágenes y su temporización. Como se tarda cierto tiempo en llenar de información una célula y en extraerla después de la transmisión, la formación de paquetes introduce algún retardo, retardo que depende de la velocidad instantánea de la información y de la longitud de la célula.

La sincronización se ve también influida por la técnica ATM. La naturaleza asíncrona



Montaje experimental para presentar la codificación de vídeo VBV. A la derecha (caja azul) está el video-codec, en el centro el PC de control, y a la izquierda el monitor de color que muestra la imagen decodificada.

del ATM hace que la red sea transparente para sincronización extremo a extremo, por lo que las señales de reloj pueden recuperarse a partir de los tiempos en los que las células llegan al lado decodificador. Sin embargo, en la red se genera una considerable fluctuación en el retardo de las células. Los niveles variables de ocupación de las colas de la red afectan a los tiempos de transferencia de células de tal forma que la temporización relativa de las sucesivas células se conserva sólo parcialmente (aunque la secuencia se mantiene). La magnitud de la fluctuación del retardo de células es de unos $250 \mu\text{s}$ ⁴. Se ha desarrollado un bucle digital especializado de enganche de fase que reduce esta fluctuación de tal modo que no se observe desdibujamiento ni ondulación de la imagen. En la entrada del decodificador se requiere también una memoria intermedia de desfluctuación, con una longitud de unas cuatro líneas de vídeo codificadas.

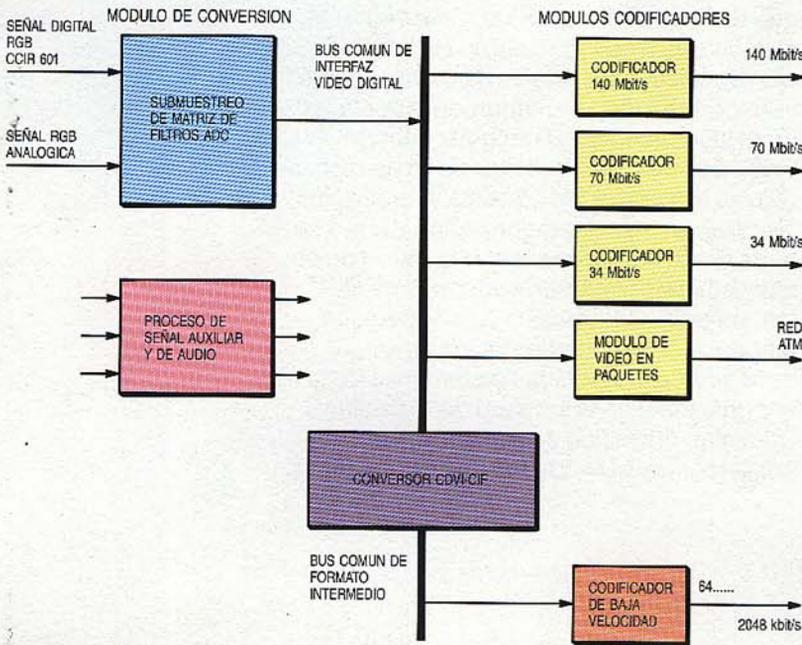
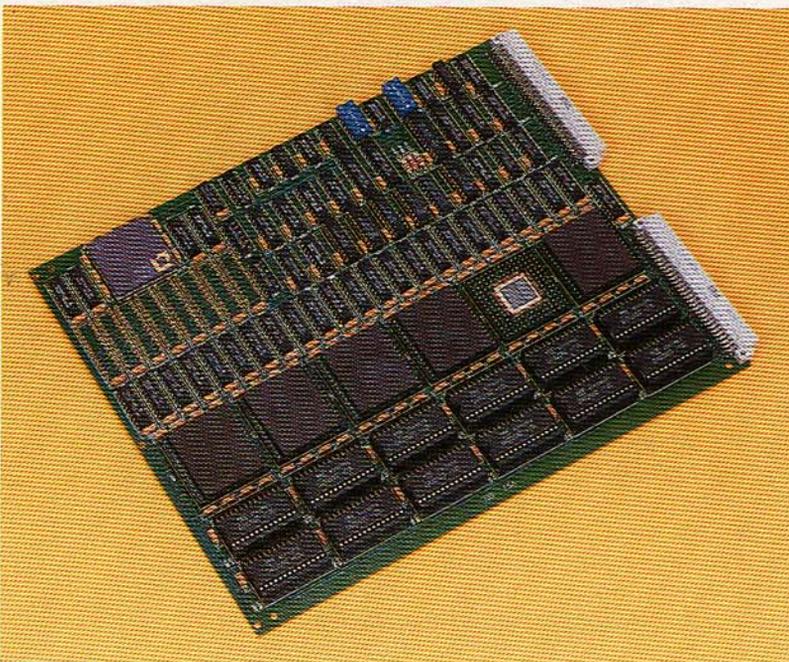


Figura 6
Estructura de la familia de codificadores de vídeo en el lado del codificador.

Realización

La transmisión de señales de vídeo es uno de los más importantes servicios nuevos en las futuras redes digitales. Inicialmente la RDSI ofrecerá canales con capacidad de 64 kbit/s, mientras que los de la RDSI de banda ancha llegarán hasta 140 Mbit/s, y habrá además otros a velocidad binaria variable. Con el fin de conseguir una sencilla realización de equipo y una conversión simple y fácil entre las señales de vídeo para diferentes servicios, deben especificarse interfaces adecuados para todas las aplicaciones. Para evitar innecesarias con-

Placa de módulo vector con seis procesadores celulares (88 células activas de procesador, de 16 bits cada una).



versiones al dominio analógico que introducirían problemas de ruido y precisión, convendrían los interfaces digitales que cumplan los requisitos de todos los servicios y se apoyen en la Recomendación 601 del CCIR.

Basándose en una CDVI (norma común de interfaz de vídeo digital), todos los codecs se pueden dividir en una parte que convierte al interfaz digital las señales externas de vídeo (señales analógicas), y otras partes que son específicas de la velocidad o dependientes de la red (Fig. 6). Aparte de la ventaja de una conversión sencilla servicio a servicio, en todos los codecs la parte de conversión puede ser idéntica, y ser realizable de modo económico la integración a muy gran escala de esa parte, por ejemplo, en cuatro circuitos de diseño a medida (incluyendo el proceso de audio). Añadiendo un circuito integrado más para la parte específica de la transmisión a 140 Mbit/s, el codec completo, capaz de transmitir audio y vídeo de alta calidad, comprendería solamente cinco circuitos integrados y unos pocos componentes estándar.

El equipo de los módulos específicos de esa velocidad dependerá de la complejidad de los algoritmos de compresión de datos y de la potencia de proceso requerida. Debido a las exigencias de velocidad y a la complejidad relativamente pequeña del algoritmo, conviene utilizar una solución a base de equipo especializado para el módulo codec de 140 Mbit/s. De aquí a dos años, Alcatel SEL habrá realizado una versión monopastilla.

Los algoritmos de compresión de datos para un módulo de baja velocidad ($p \times 64$ kbit/s) son sustancialmente más complejos que para el módulo de 140 Mbit/s. Sin embargo, los requisitos de transmisión son menos exigentes, por lo que es posible realizarlo a base de procesadores de señal o un procesador paralelo especial. Al no haberse todavía establecido normas para los servicios de vídeo de baja velocidad, la realización con procesadores permite llevar a la práctica con bastante rapidez algoritmos nuevos o modificados sin cambios en el equipo. En una placa conteniendo seis procesadores celulares (placa de módulo vector), que ya tiene como prototipo Alcatel SEL, podrán realizarse en los próximos dos años los principales algoritmos de compresión de datos para un módulo de baja velocidad.

Conclusiones

Alcatel prosigue activamente las investigaciones sobre codificación de vídeo para

redes de banda ancha. Se han definido técnicas de codificación de vídeo a baja y alta velocidad, que satisfacen las exigencias de una serie de servicios de vídeo. La investigación del ATM para la transmisión de vídeo ha descubierto tanto sus ventajas como los problemas técnicos que restan por resolver: se trabaja ahora en solucionar la pérdida de células, los errores impulsivos, los retardos y fallos de sincronización. Ha sido también propuesta una estructura genérica de videocodec y se han definido partes comunes para todas las aplicaciones.

4 W. Verbiest, L. Pinnoo y B. Voeten: The Impact of the ATD Concept on Video Coding: *IEEE JSAC on Broad-band Networks*, publicado a fines de 1988.

Rainer Heiss nació en 1958 en Bad Hornburg, Alemania. Se graduó Dipl. Ing. en ingeniería eléctrica en la Technische Hochschule de Darmstadt, en 1981, y cuatro años después se doctoró con un trabajo sobre algoritmos de compresión de datos para vídeo digital. El Dr. Heiss ingresó luego en Alcatel SEL, donde es actualmente jefe del departamento de codificación de vídeo en el Centro de Investigación.

André Rousseau es graduado de la Ecole Supérieure d'Électricité (Malakoff, 1974). Ingresó en Alcatel CIT en 1974, con la responsabilidad de especificación y realización de sistemas analógicos y digitales de transmisión de vídeo. Desde 1986 ha dirigido un grupo de producto encargado del diseño y especificación de codecs de alta velocidad para vídeo y audio.

Willem Verbiest nació en 1958 en Gante, Bélgica. Se graduó MS en física nuclear en la Universidad Estatal de Gante, en 1981. Tras un corto período en el CERN, en Ginebra, ingresó en el Centro de Investigación de Alcatel Bell Telephone donde participó en la investigación sobre la RDSI de banda estrecha. En 1984, el Sr. Verbiest comenzó a investigar sobre técnicas de paquetes en vídeo. Actualmente se dedica a la codificación y la protección contra errores de los servicios de vídeo para redes ATM.

Referencias

- 1 Recomendación 601 del CCIR: Parámetros de codificación digital para estudios: *Recomendaciones e Informes del CCIR*, 1982, volumen XI, parte 1, Unión Internacional de Telecomunicaciones, Ginebra.
- 2 Documento del CCIR: Codificación MICD híbrida de señales de televisión de estudio para la transmisión a 135 Mbit/s: *Grupo Interino de Trabajo de la Comisión Mixta de Telefonía y Transmisión*, mayo 1986, 2-2.
- 3 M. De Prycker: Comunicación de datos en una red ATM: *Comunicaciones Eléctricas*, 1988, volumen 62, n° 3/4, págs. 333-337 (en este número).

Demodulación multiportadora a bordo de satélites para repetidores no transparentes

Para conseguir estaciones terrenas de bajo costo que extiendan los servicios del satélite a gran cantidad de usuarios, es esencial llegar a nuevos conceptos de carga útil. Los demoduladores multiportadora juegan un papel vital en la nueva generación de cargas útiles de comunicaciones. El modelo de laboratorio desarrollado demuestra la factibilidad de demodular con esta técnica un grupo grande de canales de baja y media velocidad binaria.

M.-L. Boucheret

Alcatel Espace, Toulouse, Francia

Introducción

Las redes de comunicación por satélite evolucionan con rapidez desde sistemas internacionales ya muy asentados hacia un nuevo conjunto de servicios de telecomunicación, no sólo los de tránsito internacional que prestan grandes estaciones terrenas sino también los servicios de empresa de baja velocidad (telefonía, datos, vídeo, etc.) integrados en una sola RDSI a través de pequeñas estaciones fijas regionales o internacionales. Además el tráfico móvil se incluirá en nuevos servicios por tierra, mar y aire.

Estos nuevos servicios se caracterizan por un gran número de usuarios y el pequeño tamaño de las estaciones terrenas, por lo que su implantación eficaz exige desarrollar y producir estaciones terrenas y móviles pequeñas y de bajo coste. Dado que los satélites transparentes de telecomunicación convencionales no resultan suficientemente rentables, está en estudio un nuevo concepto de carga útil basado en regenerar la señal a bordo. Dichas cargas útiles de nueva generación podrían ofrecer:

- técnicas diferentes de acceso para los enlaces ascendente y descendente, a fin de optimizar el consumo de potencia en el segmento terrenal y espacial
- cobertura de haz múltiple que permite usar estaciones terrenas de baja potencia y por tanto poco costosas
- conmutación a bordo, evitando un doble tramo a través de una estación terrena nodal y proporcionando interconexión de tráfico y haces.

Si se desea conseguir todas estas características habrá que desarrollar un demodulador multiportadora (MCD). La conmutación a bordo y el uso de técnicas diferentes de acceso múltiple en el enlace ascendente y el descendente requiere demodular los diferentes canales de telecomunicación. En el caso de utilizar AMDF/SCPC (acceso múltiple por distribución en frecuencia y un solo canal por portadora) en el enlace ascendente y MDT (multiplexación por división de tiempo) en el enlace descendente, se habrán de demultiplexar varios cientos de canales y demodularlos luego a banda base.

La cantidad de canales a procesar crea el mayor problema, dado el alto consumo y la masa de los demoduladores de técnicas convencionales, equipados a uno por canal. Una nueva técnica de demultiplexación y demodulación global de un amplio grupo de portadoras permite reducir dichos consumo y masa, pudiendo así construirse cargas útiles de satélite con regeneración de señales.

Principio del demodulador multiportadora

La figura 1 es un diagrama de bloques de un MCD cuya entrada es una señal AMDF/SCPC, ya pasada a banda base. La estructura consta de dos bloques principales:

- demultiplexor, que regenera los canales individuales y los traslada a sus respectivas bandas base (descanalización)
- demodulador, que detecta los trenes de bits de cada canal; este bloque incluye

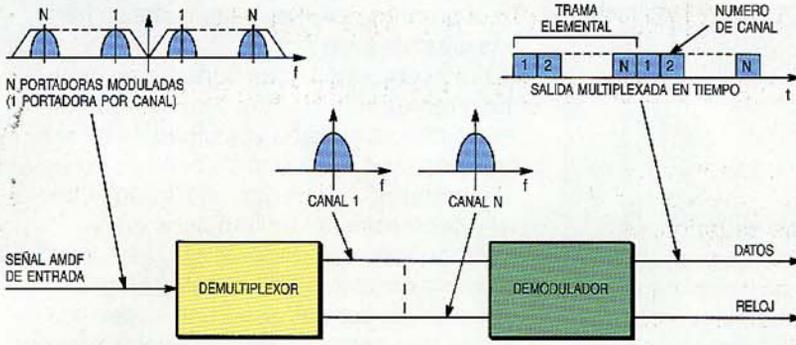


Figura 1
Arquitectura general de un MCD.

circuitos de recuperación de portadora y reloj para asegurar una demodulación coherente correcta.

Contexto del estudio

Alcatel Espace, en estrecha cooperación con Telespazio y la Universidad de Florencia, ha estudiado esta nueva técnica como parte de un contrato de I+D de Intelsat. En concreto, Alcatel Espace fue responsable de recomendar tecnologías y de realizar un modelo de laboratorio para validar el nuevo concepto.

El estudio de Intelsat comprende tres fases principales:

- evaluación de cuatro tecnologías diferentes
- investigación de varias arquitecturas posibles
- elección de una tecnología y una arquitectura que conduzcan hacia un prototipo cuyas pruebas habrán terminado a principios de 1989.

Además, Alcatel Espace tiene en curso un estudio interno, basado en estos resulta-

dos, que contempla el uso de un MCD para servicios fijos (por ejemplo, el Intelsat IBS) o móviles de telecomunicación, y también para mejorar la eficiencia de los algoritmos digitales.

Principales especificaciones

Todas las velocidades de transmisión consideradas (tabla 1) están de acuerdo con los estándares de transmisión de la red abierta IBS. Se utiliza modulación MDP4, y el margen dinámico y la estabilidad de frecuencia especificados hacen innecesario el uso de control automático de ganancia y de frecuencia.

Las dos arquitecturas a estudiar son:

- MCD básico, el algoritmo más simple para demultiplexar y demodular portadoras continuas. El MCD funciona con valores fijos de velocidad binaria, anchura de banda y frecuencia central.
- MCD potenciado, considerando como mejoras las portadoras en modo ráfagas con velocidad fija (entre 2 y 16 Mbit/s) y las anchuras de banda y velocidades variables, dentro éstas de un conjunto limitado.

En el modelo de laboratorio se ha realizado una versión básica con un solo canal.

Tecnología

Se estudiaron tres posibles técnicas. La primera fue la tecnología acústooptica. Aunque es una técnica prometedora, no está aún suficientemente madura y por ello fue descartada. En la práctica, no se espera producción en masa ni componentes fiables hasta dentro de varios años.

La segunda tecnología estudiada fue la de ondas acústicas superficiales. Los dispositivos de este tipo, sin embargo, no permiten diseñar filtros de tiempos largos de respuesta a impulsos, y además se comportan mal ante la temperatura. Por tanto, fue también desechada.

La tercera tecnología, el proceso digital de la señal, tiene todas las ventajas de la ejecución digital, tales como la reproductibilidad y la posibilidad de integración en gran escala mediante circuitos integrados específicos de la aplicación. Para llevarla a cabo se utilizó la lógica CMOS avanzada, técnica muy similar a otras ya homologadas para aplicaciones espaciales. Por consiguiente, se adoptó el proceso digital de señal, que parece ser especialmente adecuado para velocidades de transmisión medias y bajas.

Tabla 1 - Parámetros de transmisión de la red abierta IBS

Velocidad de información (kbit/s)	Velocidad de datos (incluido el 6,7% de sobrecarga) R_d (kbit/s)	Velocidad de transmisión (R) código FEC tasa = 1/2	Unidad de banda ocupada (Hz) $2B \approx 0,6 \times R \approx 1,2 \times R_d$	Unidad de banda asignada = $k \cdot 22,5$ kHz
64	68,3	137	82 k	112,5 k
128	136,5	273	164 k	202,5 k
256	273,1	546	328 k	382,5 k
384	409,6	819	492 k	585,0 k
512	546,1	1092	655 k	765,0 k
768	819,2	1638	983 k	1147,5 k
1536	1638,4	3277	1,97 M	2,295 M
1544	1638,4	3277	1,97 M	2,295 M
1920	2048,0	4096	2,46 M	2,880 M
2048	2184,5	4369	2,62 M	3,060 M

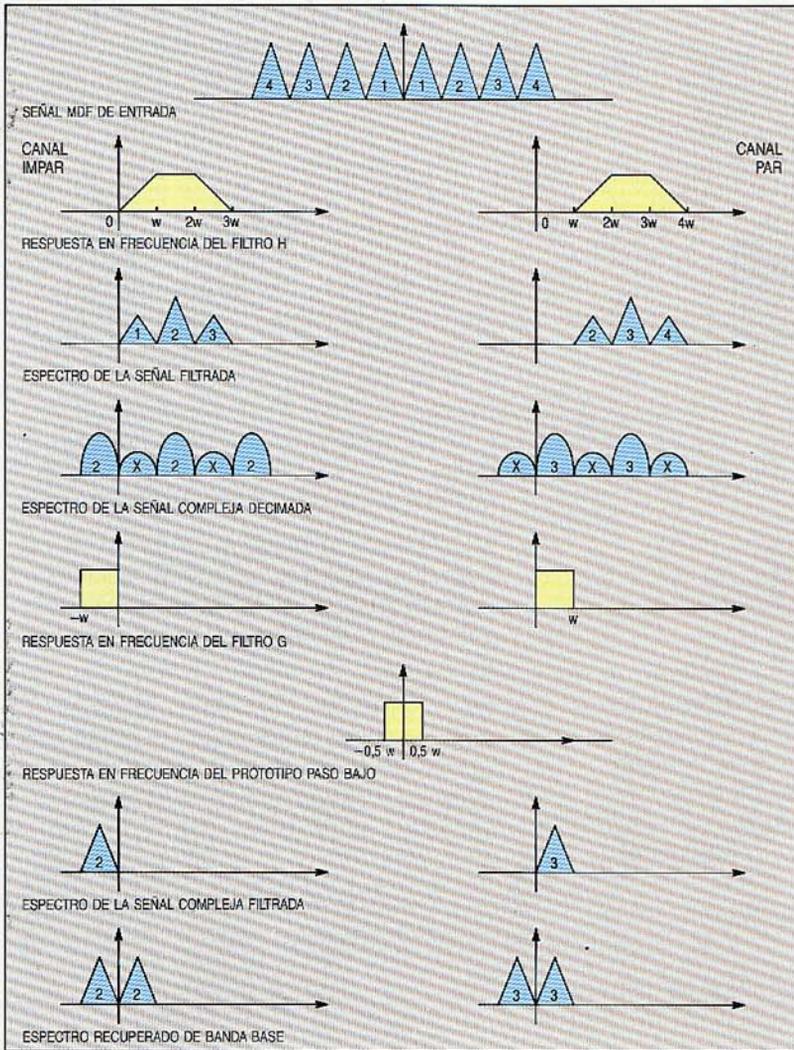


Figura 2 Demultiplexación por el método de análisis de la señal.

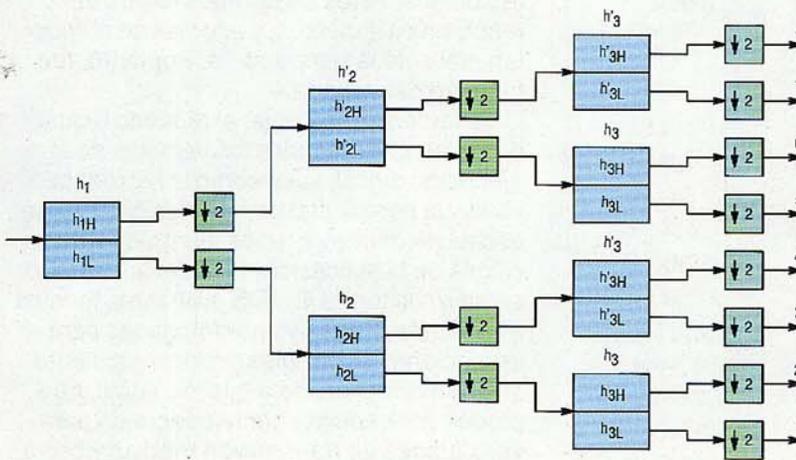
Arquitectura

Demultiplexor

Se investigaron tres tipos de diseño para el demultiplexor¹:

- método de análisis de la señal
- método multietapa
- método de bloque.

Figura 3 Estructura multietapa.



En el primero de ellos, cada canal se traslada a banda base por decimación¹ mediante un filtro complejo H que consta de dos filtros reales H' y H'' (Fig. 2). El filtrado se lleva a cabo a elevada velocidad de muestreo, pero con anchuras de banda de transición grandes¹. Se realiza un filtrado adicional y conformación de impulsos en un segundo filtro complejo G, a su vez constituido por otros dos filtros reales G' y G''. Este filtro de banda base tiene especificaciones más estrictas, pero funciona a menor velocidad de muestreo.

El método de multietapa se aprecia en la figura 3. La banda de la señal se divide en dos por un filtro de anchura de banda mitad, y se decima por dos. Cada salida se filtra de nuevo y se muestrea: al cabo de K etapas existen 2^K salidas. En cada etapa existen salidas intermedias con diferentes velocidades de transmisión. Un filtro divisor consta de dos filtros de media banda separados por la mitad de la frecuencia de muestreo. Se obtiene así una atractiva estructura modular de división binaria multietapa, con todos los filtros esencialmente iguales. La demultiplexación de un canal se presenta en la figura 4.

Finalmente, el método de bloque, en vez de considerar cada canal individualmente, procesa N_c intervalos de tiempo simultáneamente utilizando un banco de filtros con transformada discreta de Fourier (Fig. 5). Esta configuración se puede dividir en dos secciones en cascada: una red polifase compartida por todos los canales y una transformada rápida de Fourier para extraer los N_c canales individuales. La red polifase¹ tiene N_c caminos retardados, cada uno con un filtro H_i que es una versión retardada de un prototipo con respuesta a impulsos finita.

Elección de arquitectura

Aunque los métodos de bloque y de multi-etapa implican menos computación, sus estructuras son inflexibles. Para el método de bloque se requieren canales de igual anchura de banda, mientras que para el método multietapa se necesitan anchuras de banda de la forma 2^K · B_{el}, siendo B_{el} la anchura de banda mínima. Por consiguiente, se eligió un método que analiza la señal para asegurar un diseño flexible del demodulador. Un importante resultado del estudio es que existe un anchura de banda de canal óptima W que minimiza la carga de procesamiento. Hay, sin embargo, un compromiso entre la disminución de W con la frecuencia de muestreo y el aumento del número de coeficientes del filtro, que impone a éste requisitos más estrictos. La carga de computación es proporcional a la frecuencia de muestreo y a la longitud del filtro. El valor óptimo de W resultó ser:

Tabla 2 – Longitudes de filtros

Velocidad de transmisión (Mbit/s)	L_H	L_G
4,3	9	28
1,09	38	28

$$W = 0,75 R_{símbolo} = 0,75 R_{bit}$$

donde $R_{símbolo}$ es la velocidad de transmisión de símbolo y R_{bit} es la velocidad de transmisión binaria.

En consecuencia, a la salida del demultiplexor hay tres muestras complejas por símbolo. La tabla 2 muestra las longitudes L_H (filtros H y H'), y L_G (filtros G y G'), elegidas para obtener una degradación máxima de 0,5 dB en la relación señal/ruido.

Demodulador

El demodulador consta de circuitos de recuperación de fase y de recuperación del reloj. Se consideraron dos posibles realizaciones de la sección de recuperación de fase. La figura 6 muestra el método de estimación de fase de la portadora en bucle, por el bien conocido algoritmo de MDP4:

$$u_p(r) = y_I(r) \text{sen}(y_Q(r)) - y_Q(r) \text{sen}(y_I(r))$$

donde los subíndices I y Q identifican las muestras en fase y en cuadratura (modulación MDP4).

El segundo método, estimación no lineal de fase de la portadora modulada en MDP4 mediante el algoritmo de Viterbi², se ilustra en la figura 7. La fase de un símbolo se estima en el punto medio de un intervalo de longitud $N_E = 2N + 1$ símbolos, siendo N el número de intervalos antes y después del símbolo. Si se tiene

$$X_n + jY_n = \rho_n e^{j\Phi}$$

la no linealidad utilizada es:

$$X'_n + jY'_n = F(\rho_n) \cdot e^{jn\Phi}$$

donde $F(\rho_n) = 1$ y $e^{jn\Phi} = e^{j4\Phi}$.

Se emplea un algoritmo especial para resolver la ambigüedad que resulta de la división por cuatro.

Aunque los bucles de enganche de fase (PLL) se comportan bien en el seguimiento, sus tiempos de adquisición no cumplen las especificaciones, sobre todo en el modo de transmisión por ráfagas. Por tanto se eligió el método de la estimación no lineal, que sólo necesita N_E símbolos para la adquisición. Por razones de fluctuación de fase se seleccionó el valor de 15 para N_E .

En el caso del circuito de recuperación del reloj, se requieren dos muestras complejas de la señal para cada símbolo de

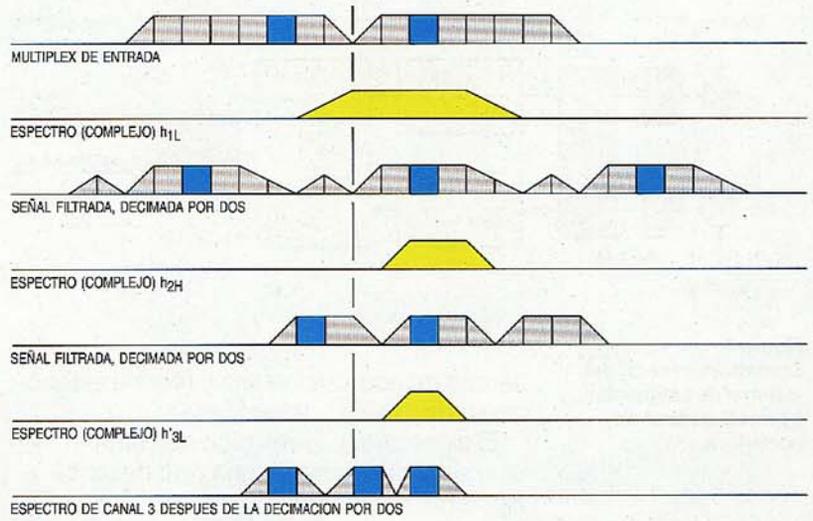


Figura 4
Demultiplexación del canal 3 por el método multietapa.

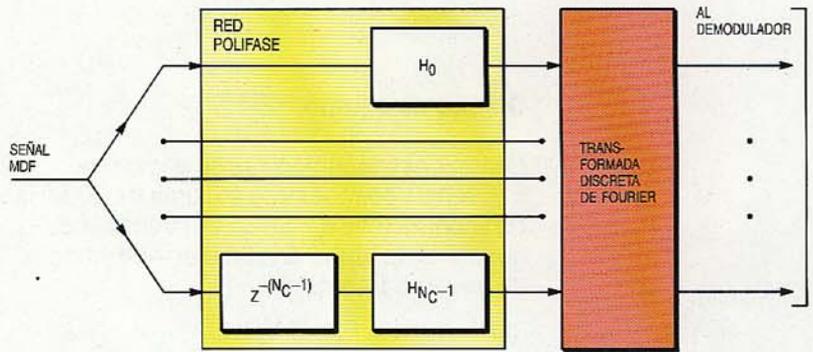


Figura 5
Demultiplexación por el método de bloque.

datos. Para el detector de error de sincronismo se utilizan dos algoritmos. El primero de ellos, aplicado a la adquisición grosera, mide el error por:

$$u_T(r) = \sum^n |y_I(r)| + |y_Q(r)| - |y_I(r-1/2)| - |y_Q(r-1/2)|$$

donde el índice r se refiere a la muestra objeto², y (r - 1/2) denota la muestra a medio camino entre las muestras de lugares (r - 1) y r. Se produce un desplazamiento de ± 1/2 de la duración de un símbolo, dependiendo del signo de $u_T(r)$. Este proceso dirigido por una decisión acorta el

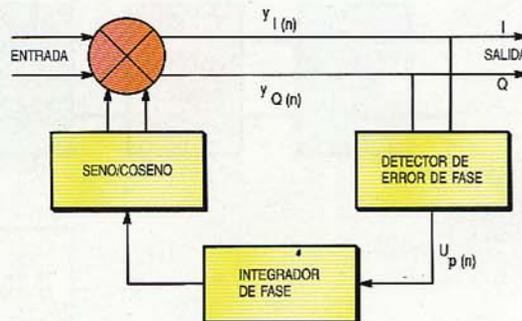


Figura 6
Recuperación de fase mediante el método de bucle.

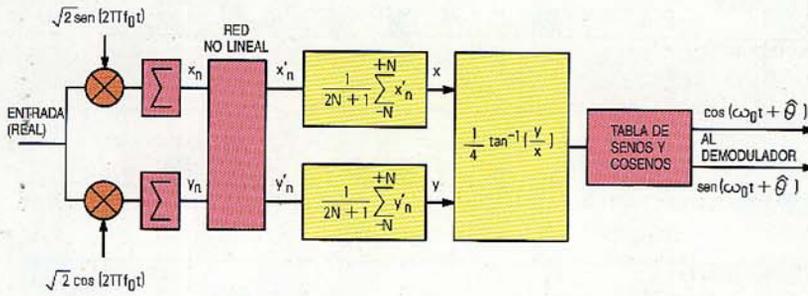


Figura 7
Estructura general del sistema de estimación no lineal de fase de portadora.

tiempo de adquisición fina y reduce el fenómeno de "caída" del procesador³.

El algoritmo de detección de Gardner⁴ se utiliza para adquisición fina, y lo describe la siguiente expresión:

$$u_T(r) = y_I(r-1/2) \{ y_I(r) - y_I(r-1) \} + y_Q(r-1/2) \{ y_Q(r) - y_Q(r-1) \}$$

Este algoritmo es adecuado tanto para adquisición como para seguimiento, y no depende de la fase de la portadora.

Diseño de equipo

Por razones tecnológicas se eligió una frecuencia de muestreo máxima de 20 MHz. La anchura total de banda del transpondedor, 72 MHz, debe dividirse en sub-bandas de anchura *B* tal que:

$$B = N_c W \text{ y } F_u = 2 N_c W$$

donde:

- F_u* – frecuencia de muestreo
- N_c* – número de canales
- W* – anchura de banda asignada a cada canal.

Por tanto *B* = *F_u*/2.

La anchura de banda del MCD es de 10 MHz, y permite velocidades de transmisión desde *R* = 137 kbit/s hasta *32R* = 4384 kbit/s.

En la figura 8 se muestra la estructura de un MCD. Está implantado el método de análisis de señal mediante dos filtros complejos *H* y *G*. El filtro *G* y el filtro adaptado, que funcionan ambos en banda base, se

han combinado en un solo filtro llamado *S* ("filtro conformador"). El filtro *H* va seguido por un convertor de frecuencia que transforma la salida compleja de *H* a banda base. Así, a la salida de los filtros *H* se dispone de tres muestras complejas por símbolo.

El filtro conformador realiza a la vez las funciones de decimación y filtrado, ya que el algoritmo de Gardner requiere sólo dos muestras complejas por símbolo. Dicho filtro se compone de cuatro subfiltros, *S*₁ a *S*₄, que generan las cuatro muestras reales por símbolo: *WBCI* y *WBCQ* (símbolos centrales), y *WBTI* y *WBTQ* (símbolos de transición). Un detector de error de sincronismo genera una señal de error *TEI* con dos muestras complejas por segundo (*WBCI* + *jWBCQ* y *WBTI* + *jWBTQ*).

El detector de error de fase genera una estimación Φ del error de fase a partir de *WBCI* y *WBCQ*. Esta estimación se resta de la fase de los datos de entrada, a través del corrector de fase, para obtener los trenes demodulados *I*, *Q*.

Demultiplexor

Existe un filtro *HH'* por canal. Como consecuencia de la máxima frecuencia de funcionamiento – 20 MHz – de los MAC (multiplicador/acumulador) y del número de multiplicaciones y acumulaciones necesarias en todos los casos (80 × 10⁶ por segundo), se ha diseñado una estructura en paralelo con cuatro MAC que procesan cuatro secuencias entrelazadas. Esta estructura realiza las funciones de filtrado y de decimación, por las cuales se procesa sólo una muestra por salida de cada *N_c* de entrada.

La traslación de frecuencia se realiza mediante inversión de signo o intercambiando los canales *I* y *Q*, lo cual equivale a una multiplicación secuencial por la serie 1, *j*, -1, -*j*, 1, *j*...

Se ha incluido un controlador para producir todas las señales de control, las cuales se generan en memorias PROM direccionadas por contadores específicos.

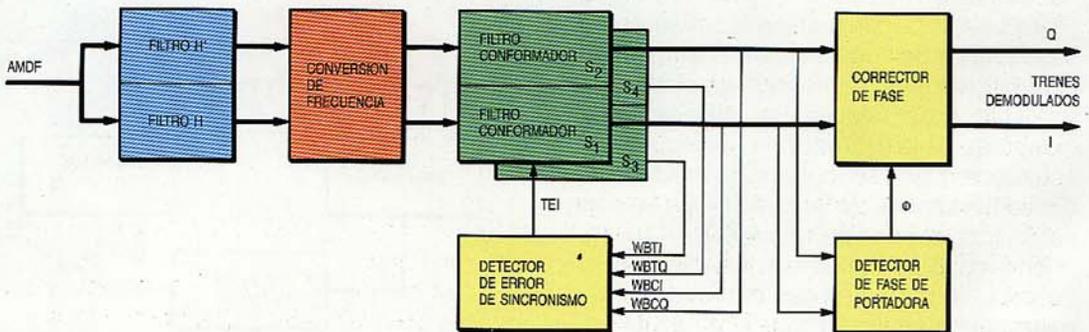


Figura 8
Estructura general del MCD.

técnica de compartición de tiempo para velocidades menores. Los errores de sincronismo se cuantifican con un paso de $T_b/24$, que da un error pequeño en régimen permanente.

Sería posible conseguir los correspondientes retardos utilizando 24 filtros S conformadores, pero el uso de memorias FIFO permite reducir este número. El error de sincronismo TEI es la suma de TEIC y TEIF, siendo TEIC la corrección grosera del error, efectuada por lectura de n , $(n+1)$ ó $(n-1)$ muestras de la FIFO, y TEIF la corrección fina, por selección de una de las ocho respuestas a impulsos de los filtros S.

Controlador

El controlador del demodulador proporciona todas las señales de control que éste necesita, y dirige los siguientes modos funcionales:

- paralelo o compartición de tiempo
- fase actual: reinicializar la fase; sincronización de la FIFO; adquisición grosera de sincronismo. Estado estable: sincronización fina, adquisición, demodulación.

El controlador consta de varios contadores y tres bloques de memorias (bloque del filtro conformador, bloque de fase y bloque de sincronización). La tabla 3 muestra la organización y las funciones requeridas para el proceso de trenes a 4,3 Mbit/s.

Modelo de laboratorio

Se está utilizando un modelo de laboratorio para validar el concepto global de demodulador multiportadora (MCD). Tiene tres canales de entrada, que funcionan a 4,3 Mbit/s o a 1,09 Mbit/s. Sólo uno de ellos se filtra y demodula; los demás se utilizan para medición de características.

Se ha realizado un filtro HH' junto con un demodulador y un sincronizador. El demodulador puede trabajar con velocidad de 4,3 Mbit/s. En el caso de funcionamiento a 1,09 Mbit/s se pueden procesar cuatro canales adaptando el controlador.

Conclusiones

El trabajo de Alcatel Espace ha demostrado la factibilidad de un demodulador multiportadora que utiliza nuevas técnicas para demultiplexar y demodular un grupo grande de canales de baja y media velocidad (inferior a 4 Mbit/s). Se ha realizado un modelo de laboratorio para validar el concepto, a base de componentes digitales de calidad. El

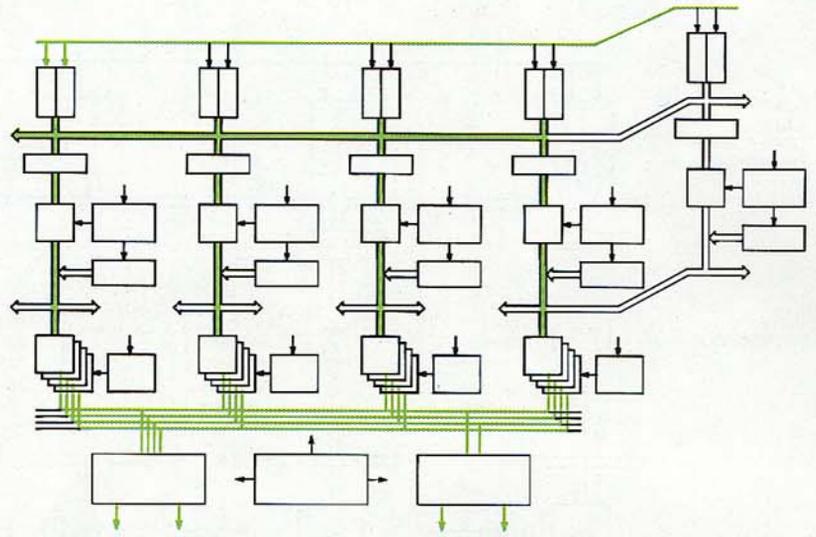


Figura 10
Funcionamiento en paralelo.

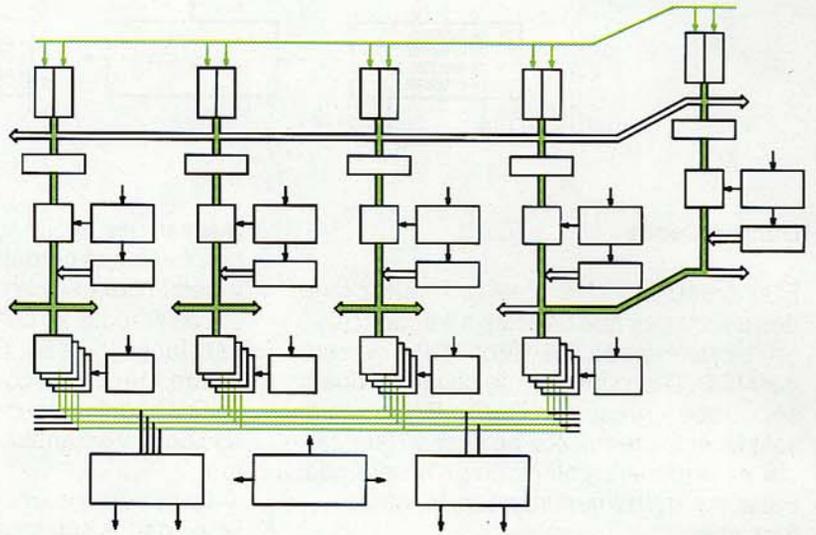


Figura 11
Funcionamiento en tiempo compartido.

resultado de los estudios confirma que el concepto de demodulador multiportadora (MCD) podría utilizarse en una futura generación de cargas útiles de satélites con transpondedores regenerativos.

No obstante, la técnica es todavía nueva y se necesitan ciertas mejoras para optimizar la arquitectura de los MCD y reducir masa y consumo. Algunas de las mejoras en estudio son:

- Una arquitectura más eficaz del demultiplexor, que reducirá su volumen y mejorará la fiabilidad, sobre todo para canales de baja velocidad.
- Evaluación de circuitos VLSI para aplicaciones específicas.

Estas mejoras se considerarán dentro del marco del estudio interno emprendido por Alcatel Espace sobre el tema de este artículo.

Referencias

- 1 R. E. Crochiere y L. R. Rabiner: Multirate Digital Signal Processing: *Prentice Hall*.
- 2 A. J. Viterbi: Non Linear Estimation of PSK Modulated Carrier Phase with Application to Burst Digital Transmission: *IEEE Transactions on Information Theory*, julio 1983, volumen IT-29, págs. 543-551.
- 3 F. M. Gardner: Hang up in Phase Lock Loops: *IEEE Transactions on Communications*, octubre 1977, volumen COM25, págs. 1210-1214.
- 4 F. M. Gardner: A BPSK/QPSK Timing-Error Detector for Sampled Receivers: *IEEE Transactions on Communications*, mayo 1986, volumen COM25, págs. 423-429.

Marie-Laure Boucheret nació en 1961. Se graduó en la Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications de Bretagne en 1985. La Sra. Boucheret entró en Alcatel

Tabla 3 – Proceso de flujos binarios a 4,3 Mbit/s

Funciones de los bloques	Número de bloques
Filtro HH'	1 por canal
Sincronizador	1 por canal
Filtro conformador	1
Detector de error de sincronismo	1
Detector de error de fase	1
Controlador	1

Espace en 1986 para trabajar en sistemas de espectro ensanchado, siendo actualmente responsable del estudio interno sobre demoduladores multiportadora.

Sistema protegido experimental de información distribuida

A medida que las estaciones de trabajo inteligentes van penetrando en el mundo de la empresa, es más necesaria la seguridad en la red, por lo que se trabaja intensamente en la normalización de sistemas de seguridad. Alcatel STK y la Administración Noruega de Telecomunicaciones han establecido una red experimental protegida para estudiar los problemas de seguridad y desarrollar posibles soluciones.

C. Fritzner

K. Presttun

J.-T. Richardsen

G. Søberg

Alcatel STK, Oslo, Noruega

Introducción

La cada vez más frecuente interconexión de ordenadores geográficamente dispersos y la sustitución de los tradicionales terminales "estúpidos" por estaciones de trabajo inteligentes, crea numerosos problemas de seguridad nuevos¹. Actualmente los sistemas de oficina utilizan con profusión tales configuraciones, pero dentro de algunos años muchos explotadores de redes se valdrán de otras similares para controlar y mantener redes públicas. Esto hará que los sistemas de información comercial sean mucho más vulnerables y disminuirá la integridad de las redes públicas.

Los organismos de normalización tales como ISO (Organización Internacional de Normalización) y ECMA (Asociación Europea de Fabricantes de Ordenadores) se esfuerzan por dar solución a estos problemas. Alcatel STK participa activamente en tales organismos y aporta información resultante del trabajo de la Compañía. El CCITT ha comenzado ahora a preparar normas para redes de gestión de telecomu-

nicaciones, y durante el periodo de 1989 a 1992 necesitará amplia información sobre la seguridad en dichas redes.

Alcatel STK está construyendo una red protegida experimental en colaboración con el Departamento de Investigación de la Administración Noruega de Telecomunicaciones (NTA), y sosteniendo una estrecha relación con los trabajos de ISO y ECMA. En paralelo con este proyecto, STK estudia asimismo problemas de seguridad que atañen al control y mantenimiento de las redes públicas.

Servicios y facilidades de seguridad

Servicios de seguridad

Los servicios de seguridad incluyen la autorización de personas y procesos, la autenticación de personas y procesos que interaccionan, y la autenticación y confidencialidad de los datos intercambiados (Tabla 1). Para tratar estos servicios de una forma genérica dentro de un entorno distribuido, la ECMA (TC32/TG9)² ha desarrollado un conjunto de diez facilidades de seguridad:

- fiador del sujeto
- autenticación
- gestión de asociación
- estado de seguridad
- gestión de los atributos de seguridad
- autorización
- interdominios

Tabla 1 - Terminología

Confidencialidad: ocultamiento del contenido de la información, a menudo mediante cifrado.

Autenticación: confirmación de que la fuente de datos es la que se pretende.

Autorización: concesión o posterior posesión de derechos.

Cifrado: transformación criptográfica de datos para producir un texto en clave.

Descifrado: acto inverso del cifrado.

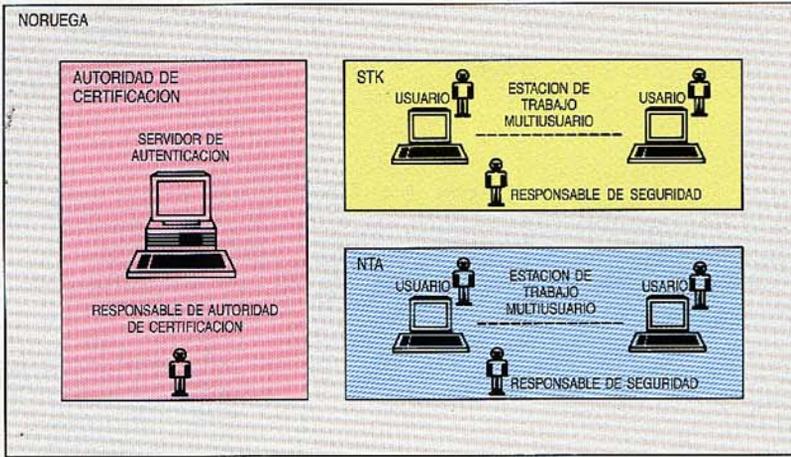


Figura 1
Modelo de dominio de seguridad.

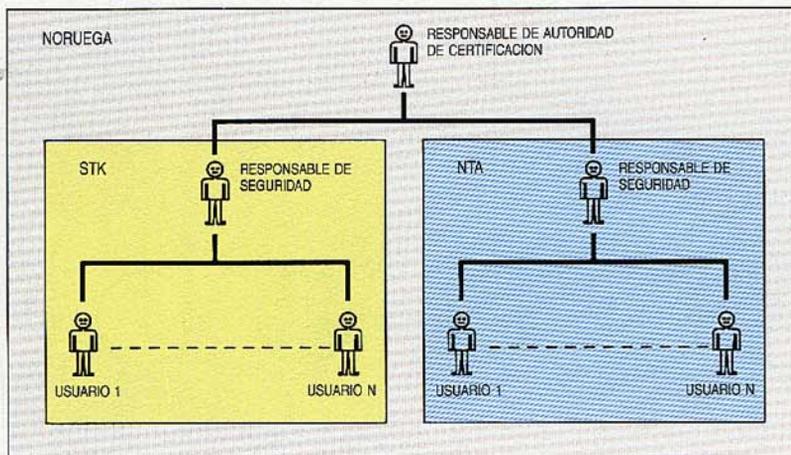
- auditoría de seguridad
- recuperación de seguridad
- apoyo criptográfico.

Se estima que combinando estas facilidades puede construirse cualquier servicio de seguridad requerido en un sistema distribuido. Además, las funciones de seguridad pueden ubicarse por separado en nodos o servidores de red especializados que atiendan a una red de terminales y ordenadores. Son ejemplos los servidores de autenticación, de autorización y de auditoría. La ECMA está ahora definiendo los servicios y protocolos que pueden separarse.

Red experimental

El sistema experimental de Alcatel STK está concebido para prestar servicios de seguridad independientes de la red en las capas ISA (interconexión de sistemas abiertos) superiores, realizar un subsistema de seguridad distribuido y demostrar la transferencia confidencial de ficheros entre objetos autorizados y auténticos.

Figura 2
Jerarquía de seguridad.



Modelo de dominio de seguridad

Un dominio de seguridad consta de objetos del sistema regulados por un mismo conjunto de leyes y normas de seguridad. La información circula dentro de un dominio, así como entre dominios distintos. El actual proyecto se ciñe a la seguridad en un sistema distribuido dentro de *un solo* dominio de seguridad, es decir, regulado por *un solo* programa de seguridad; tal dominio se llama NORUEGA. La figura 1 muestra los objetos del dominio.

La CA (autoridad de certificación) es un organismo, tal como administración de telecomunicación u oficina nacional de registro, que controla el registro de objetos (usuarios, procesos, entidades, ordenadores, etc) dentro de un dominio de seguridad y mantiene un directorio público de dichos objetos. En cada inscripción de ese directorio figura un nombre, una dirección y un certificado de clave pública. Un objeto se acredita como legal en el dominio al registrarse en el directorio CA, basado en la Recomendación CCITT X.500³, es una fuente común y fiable de información de objetos para el dominio, ofreciendo el servicio de directorio a través de uno o más AS (servidores de autenticación), que son procesadores con base de datos conectados a una red. El gestor de CA es una persona de confianza que administra la autoridad de certificación.

Las *localizaciones de dominio* son unidades organizativas repartidas geográficamente dentro de un dominio de seguridad, y en este caso son los socios del proyecto, Alcatel STK y NTA. Las redes de área local de cada localización se interconectan a través de la red pública de datos. Cada localización la administra un gestor de seguridad, responsable de la gestión de parte del sistema y de introducir en el mismo a los usuarios ordinarios.

La figura 2 muestra la correspondiente jerarquía de seguridad de las personas comprendidas en este dominio.

Funcionalidad

Las funciones de seguridad en el sistema experimental distribuido son las siguientes:

- autorización de usuarios en la fase de presentación
- autenticación de usuarios en la fase de apertura de sesión
- autenticación de objetos con certificados de clave y señales de autenticación en la fase de establecimiento de asociación
- intercambio confidencial de claves de asociación en esa misma fase

- transferencia confidencial de datos en la fase de transferencia de datos.

La *autorización de usuarios* la asume un gestor de seguridad en una estación de trabajo local. El usuario es introducido al sistema operativo en la forma usual UNIX⁴, y se le autoriza para desarrollar operaciones de cifrado mediante la concesión de una inscripción con claves personales de criptografía simétricas y asimétricas.

La *autenticación de usuarios* se basa en contraseñas según el método usual UNIX de identificación.

La *autenticación de objetos*, que establece una asociación, se apoya en la Recomendación X.509 del CCITT. La figura 3 muestra el intercambio de autenticaciones y claves de asociación durante la fase de establecimiento de asociación. Las entidades A y B utilizan certificados de clave pública⁵ otorgados por una autoridad de certificación para probarse sus identidades mutuamente³. B comprueba la señal de autenticación procedente de A utilizando el certificado de A, y A comprueba la autenticación procedente de B mediante el certificado de B. Dicha señal de autenticación contiene también la clave de asociación para el cifrado de datos. El *intercambio confidencial de claves de asociación* forma parte de la autenticación de objetos.

La *transferencia confidencial de datos* queda asegurada al cifrar los datos salientes en una asociación y descifrar los datos entrantes en una asociación con la clave secreta intercambiada al establecer tal asociación.

Arquitectura

El proyecto actual incorpora seguridad a las capas de aplicación y presentación del modelo ISA⁶. La ventaja de integrar los mecanismos de seguridad en las capas ISA superiores es que son independientes de la red, obteniéndose así una solución más económica que la de tener métodos de seguridad específicos para cada tipo de red. La seguridad se integra en el ESCA (elemento de servicio de control de asociación)^{7,8} y el ESP (elemento de servicio de presentación)^{9,10}. El subsistema de seguridad se diseña como soporte a los métodos de seguridad alternativos o complementarios. Puede utilizarse el mismo sistema para la seguridad de elementos de servicio específicos de la capa de aplicación tales como:

- arquitectura abierta de documentos de oficina
- sistema de mensajería
- gestión, acceso y transferencia de ficheros



Figura 3
Intercambio de autenticación basada en directorio.

- proceso de transacciones
- terminal virtual.

Subsistemas

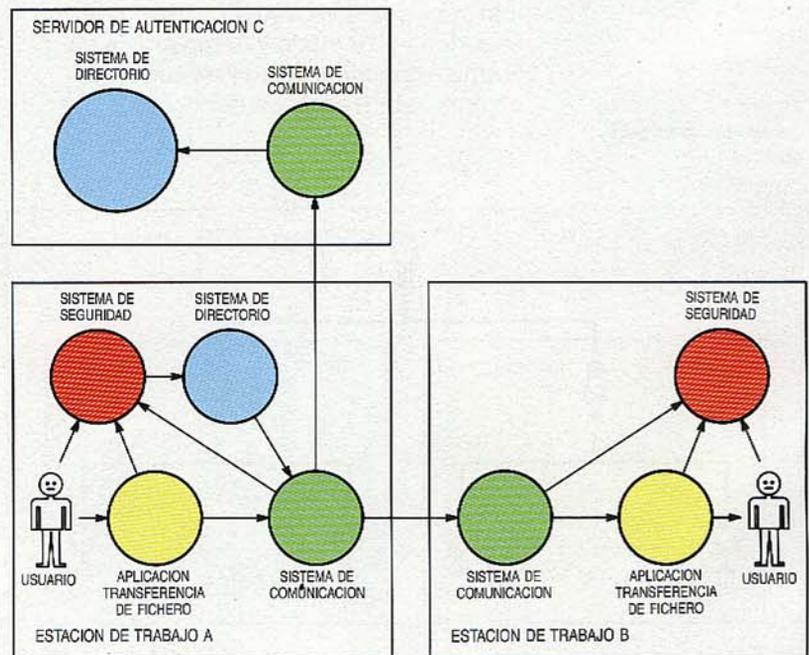
El sistema general se divide en cuatro subsistemas:

- aplicación de transferencia de ficheros
- sistema de directorio
- sistema de comunicación
- sistema de seguridad.

La figura 4 ilustra las relaciones entre estos subsistemas y el modo en que se utilizan para una transferencia confidencial de ficheros. La *aplicación de transferencia de ficheros* es la escogida en esta fase para demostrar la base de seguridad genérica ISA. Estas aplicaciones utilizan los servicios ofrecidos por el sistema de comunicación y el de seguridad.

El *sistema de directorio*, que ofrece un servicio de directorio general, se emplea en este proyecto para la creación, modificación y extracción de inscripciones que contienen nombres, direcciones y certificados de

Figura 4
Transferencia protegida de ficheros.



clave pública de los objetos usuarios. Utiliza los servicios ofrecidos por el sistema de comunicación.

El sistema de comunicación proporciona servicios de comunicación a las aplicaciones. Este sistema está mejorado con los servicios que ofrece el sistema de seguridad para proporcionar servicios de comunicación protegidos.

El sistema de seguridad proporciona al sistema operativo servicios de seguridad tales como autorización, autenticación y confidencialidad.

Arquitectura de red

La figura 5 muestra la red experimental constituida por la red de área local del Centro de Investigación de Alcatel STK y la red de área local del Departamento de Investigación de NTA, interconectadas por la red pública de datos X.25. A la red se conectan los siguientes componentes:

- Estación de trabajo Alcatel Xtra 386 PC, en la cual el usuario ejecuta aplicaciones relativas a su trabajo.
- Servidor de autenticación Alcatel Xtra 386 PC, un servidor de directorio centralizado en el que se registran todos los objetos del sistema (usuarios, procesos, entidades) con sus nombres, direcciones y certificados de clave pública.
- Conexión SUN Microsystems 3/60 que traduce los paquetes de red de uno a otro tipo de red.

Se utilizó un ordenador personal Xtra 386 como máquina objeto experimental, en la que se ejecuta el sistema operativo 386 XENIX. La parte de red del sistema de comunicación es una placa de ampliación PC RAL (red de área local) con TCP/IP (protocolo de control de transporte/protocolo Internet del Departamento de Defensa de EE.UU.).

La parte criptográfica del sistema de seguridad es una placa de ampliación para seguridad de PC con programación de interfaz XENIX⁴ desarrollada en el Centro de Investigación de Alcatel STK. Partiendo de esta configuración, se desarrolló una estación de trabajo PC con facilidades de seguridad y un servidor de autenticación basado en directorio, la cual incluye:

- aplicación de transferencia de ficheros
- sistema directorio de estación de trabajo
- sistema de seguridad de estación de trabajo
- sistema de comunicación,

mientras el servidor de autenticación (AS) incorpora:

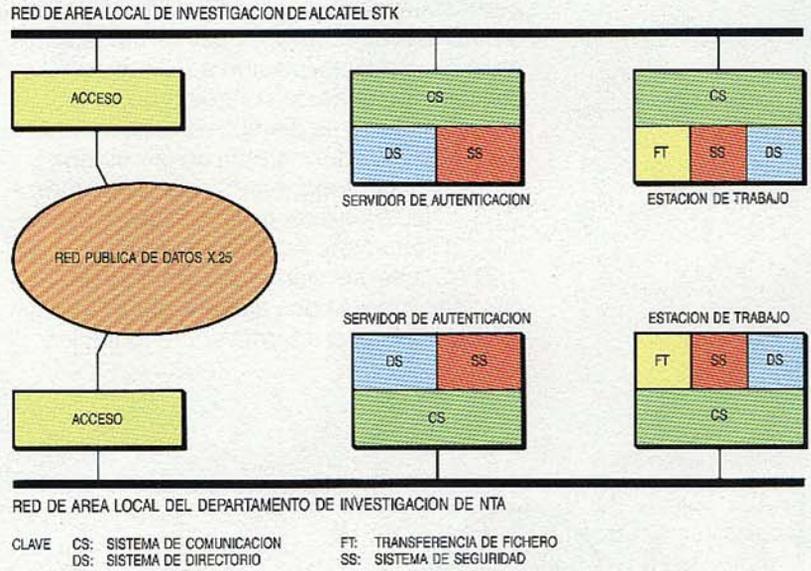


Figura 5
Topología de una red experimental.

- sistema de directorio para AS
- sistema de seguridad para AS
- sistema de comunicación.

Aplicación de transferencia de ficheros

Se eligió la aplicación de transferencia de ficheros para esta fase de la red experimental. Basado en la FTAM (transferencia, acceso y gestión de ficheros)¹¹, es utilizado

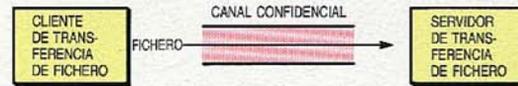


Figura 6
Transferencia confidencial de un fichero.

para ejemplificar de qué modo una aplicación solicita al sistema de seguridad que transfiera ficheros confidencialmente a un cierto destino, estableciendo un contexto de seguridad para el proceso de aplicación.

En la figura 6 el canal confidencial es un canal extremo a extremo entre dos PC a través de ambas RAL y la red pública de datos, según refleja la figura 5. Un intruso que se inmiscuya en la red no puede extraer el contenido de información del fichero.

Sistema de directorio

El sistema de directorio³ almacena información sobre objetos del mundo real (p.ej., países, personas, ordenadores), y la suministra a los usuarios del directorio que la soliciten para facilitar la comunicación entre objetos. Estos usuarios, tanto personas como procesos de aplicación, son representados por AUD (agentes usuarios de directorio); éstos son procesos de aplicación que permiten a los usuarios - con

permiso de acceso – leer o modificar información del directorio, globalmente denominada base de información del directorio. Las inscripciones de objetos que componen dicha base se distribuyen entre varios ASD (agentes del sistema de directorio), que son los componentes activos del directorio. El sistema directorio para la red experimental se expone en la figura 7.

El ASD del servidor de autenticación contiene toda la base de información del directorio, la cual informa sobre todos los

para leer, modificar, o buscar inscripciones en la base de información del directorio.

El AUD se conecta al directorio mediante *operaciones de ligadura* (elementos de servicio de operaciones remotas)¹² y solicita del ASD servicios de directorio, a través de elementos del servicio de aplicación de directorio. Las operaciones de ligadura del directorio están representadas en el ESCA (elemento de servicio de control de asociación)^{7,8}, así como los elementos del servicio de aplicación de directorio lo están por los elementos del servicio de operaciones remotas^{12,13}, según se especifica en el protocolo de acceso al directorio. Para impedir que el AUD envíe demasiadas peticiones al ASD, el primero mantiene una base de datos local que almacena copias de las inscripciones recibidas en las anteriores peticiones al segundo. Como las normas de directorio no regulan procedimientos o protocolos para este tipo de copia de las inscripciones, la realización no está normalizada. Las inscripciones de objetos solamente se mantienen por el directorio en el ASD que guarda la *copia maestra*.

La fase de autenticación de la sesión de comunicación entre las dos estaciones de trabajo se desarrolla según el sistema de autenticación de directorio (Recomendación X.509 del CCITT). La parte llamante (A) necesita obtener el certificado de clave pública de la parte llamada (B), lo que realiza el AUD en nombre del usuario buscando primeramente la correspondiente inscripción objeto en la base de datos local. Si dicha inscripción de B no se encuentra, o el certificado de clave pública está caducado, el AUD lee la inscripción objeto desde el ASD, como ya se ha descrito. Esta inscripción se utiliza luego en la asociación siguiente y se copia también en la base de datos local, actualizando así la inscripción objeto. Debe señalarse que la parte llamada (B) no necesita comunicarse con el directorio durante el establecimiento de la asociación.

Sistema de seguridad

El sistema de seguridad en cada estación de trabajo y servidor de autenticación es un módulo soporte para las aplicaciones y el sistema de comunicación, que ofrece al entorno un conjunto de servicios de seguridad. Para controlar el contexto de seguridad de cada proceso de aplicación, hay una tabla de procesos de aplicación que contiene información de seguridad perteneciente a procesos individuales. Las entradas de esta tabla consisten en nombres, certificados e información de seguridad.

El sistema de seguridad incluye un subconjunto de las facilidades de seguridad ECMA, a saber:

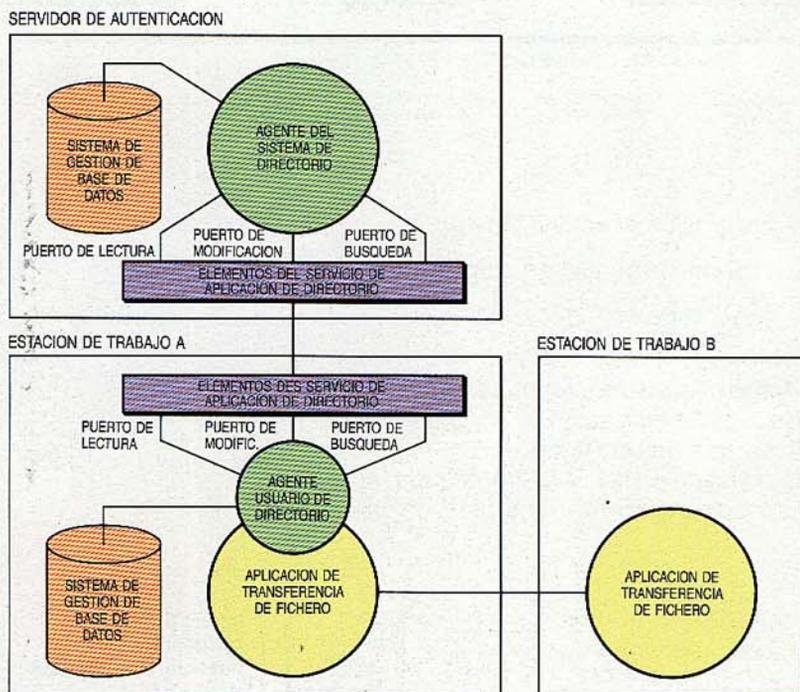


Figura 7
El sistema de directorio.

objetos en la red. Cada inscripción contiene, al menos, los siguientes atributos:

- nombre común, que identifica la persona, proceso de aplicación, entidad de aplicación, etc.
- certificado de clave pública, que se utiliza para autenticar dos intercomunicantes
- dirección opcional, que puede ser X.121, RDSI, presentación, o de otro tipo.

Todas las inscripciones de objetos se almacenan en el disco rígido del servidor de autenticación.

El AUD accede al directorio en nombre del proceso de aplicación de transferencia de fichero. Todos los servicios de directorio son solicitados y recibidos por el AUD a través de puntos de acceso, cada uno de los cuales corresponde a tres tipos diferentes de puerto. Dichos puertos definen varias operaciones de directorio, utilizadas

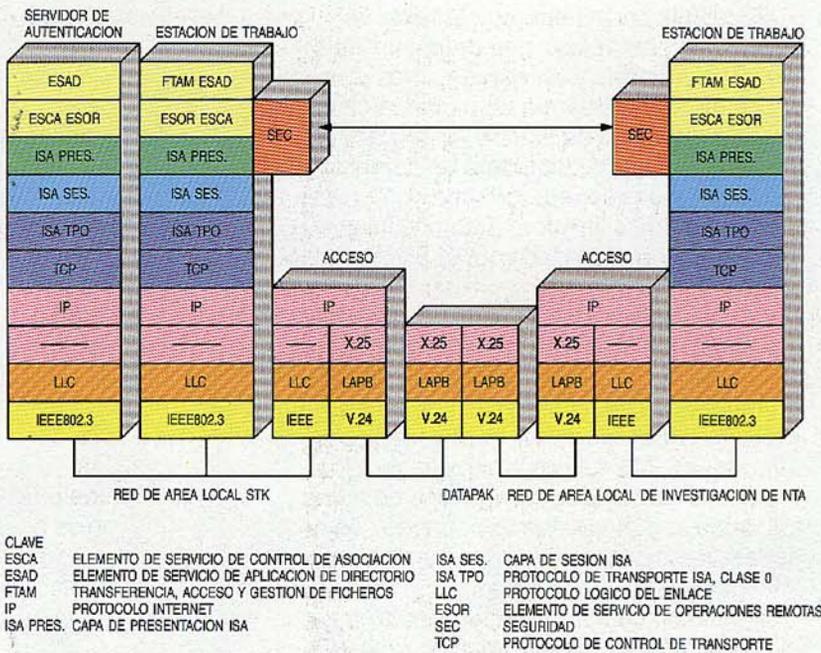


Figura 8
Jerarquía de protocolo en una red experimental.

- Facilidad de autorización, que apoya la autorización y desautorización de objetos (usuarios, procesos, entidades) en el sistema. Cuando se introduce un objeto, se le registra en un directorio central con su certificado de clave pública. Los objetos autorizados pueden efectuar entre sí ciertas operaciones relativas a la seguridad.
- Facilidad de gestión de asociación, que apoya el establecimiento, control y disolución de asociaciones protegidas entre los procesos de aplicación del sistema. Una asociación protegida (segura) implica la autenticación y el intercambio de claves en la fase de establecimiento, y el cifrado de datos en la fase de transferencia de datos. Esta facilidad utiliza la tabla de procesos de aplicación para controlar el contexto de seguridad de cada asociación.
- Facilidad de autenticación, que provee la generación y comprobación de la señal

de autenticación, la cual es la estructura de datos que permite a una entidad comunicante comprobar la identidad de otra.

- Facilidad de soporte criptográfico, que provee la transformación de datos, incluyendo cifrado y descifrado simétrico y asimétrico.

El núcleo de la facilidad de soporte criptográfico es una placa de ampliación de PC en la que se realizan físicamente los algoritmos de criptografía DES (*data encryption standard*, norma de cifrado de datos¹⁴) y RSA (Rivest-Shamir-Adleman⁵). El algoritmo DES trabaja a unos 200 kbit/s, y el RSA a alrededor de 10 kbit/s. Un aspecto crítico en los protocolos de cifrado es el tiempo. Para asegurar una correcta cronometría en el sistema, la placa de ampliación contiene un reloj de tiempo real a prueba de manipulaciones inexpertas, con batería de reserva para evitar la puesta a cero no autorizada.

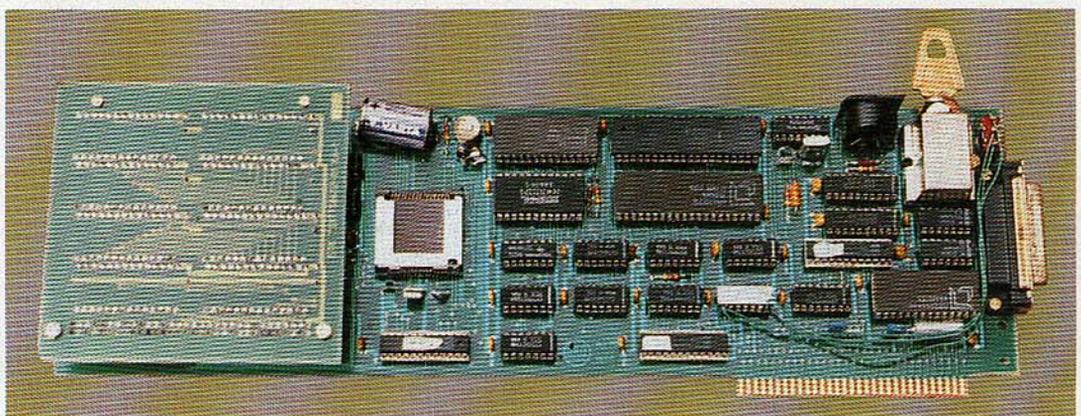
Sistema de comunicación

El sistema de comunicación en cada ordenador personal consta de protocolos ISA¹⁵ de capa alta (capas 5 a 7) y protocolos no ISA de capa baja (1 a 4). Cada uno de los tres tipos de máquinas especializadas en las redes tiene su propio módulo específico de comunicación.

Los protocolos de capa baja son comunes a todas estas máquinas, y en cambio hay unos protocolos específicos de capa alta para la estación de trabajo y el servidor de autenticación. No hay protocolos de capa alta en la conexión principal ya que el encaminamiento entre la RAL y la red X.25 Datapak sólo afecta a los niveles 1 a 3. El encaminamiento Internet se realiza mediante un paquete de soporte lógico que se ejecuta en la máquina de conexión Sun 3/60.

Jerarquía de protocolo

La figura 8 muestra la jerarquía de protocolo en la red experimental¹⁶, indicando los



Placa de ampliación para seguridad en un ordenador personal.

elementos de servicio de aplicación siguientes:

- Transferencia, acceso y gestión de ficheros, que proporciona medios para transferencia de ficheros a la aplicación así denominada.
- Elemento de servicio de control de asociación, que aporta las facilidades básicas para controlar una asociación-aplicación entre dos entidades de aplicación que se comunican mediante una conexión de presentación.
- Elemento de servicio de aplicación de directorio, que provee facilidades para creación, modificación y extracción de inscripciones en la base de datos del directorio.
- Elemento de servicio de operaciones remotas, que ofrece los medios para realizar operaciones a distancia entre entidades de un sistema distribuido.

Protocolos de capa baja

Las capas inferiores se basan en protocolos TCP/IP, en el nivel superior del control lógico del enlace en la capa 2 y del protocolo IEEE 802.3 en la capa 1. Ello se hace así porque en todas las máquinas de la red se ejecutan UNIX o XENIX⁴, y el TCP/IP en la RAL tiene soporte en la mayoría de las máquinas UNIX.

En la capa de transporte, se utiliza el protocolo de transporte ISO, clase 0, en el nivel superior del protocolo TCP de la estructura de capas ISA. Como la capa de sesión trabaja con tamaños de bloque ilimitados que el protocolo TCP no puede tratar, se necesita el protocolo de transporte de clase 0 para dividir y volver a componer paquetes de transporte¹⁶.

Cada ordenador personal está equipado con una tarjeta RAL que incorpora el soporte lógico del protocolo TCP/IP.

Protocolos de capa alta

Las capas de sesión y presentación son las mismas, tanto en el servidor de autenticación como en la estación de trabajo. Sin embargo, la capa de aplicación es diferente, ya que dichos servidor y estación de trabajo realizan servicios diferentes y tienen distintas tareas de seguridad asignadas.

Seguridad en los protocolos de capa alta

Puede desarrollarse un verdadero servicio de seguridad extremo a extremo implantando seguridad en capas superiores a la de red¹. En esta red experimental se decidió integrar la seguridad en la capa de presentación en el ESP, y en la capa de aplicación en el ESCA.

Cada aplicación tiene un contexto de seguridad local válido, que define los servicios de seguridad y los mecanismos que van a utilizarse. Cuando un usuario activa una transferencia de fichero, la aplicación correspondiente establecerá un contexto de seguridad si se requiere una comunicación protegida, y la información de tal contexto será luego utilizada por el ESCA y el ESP.

La confidencialidad de los datos se integra en el ESP utilizando el cifrado y descifrado que proporcionan los medios de criptografía. Cada vez que llega un mensaje P-DATA, el ESP comprueba el contexto de seguridad y, si está preparado, llama a los medios antes citados para cifrar o descifrar los datos según el referido contexto. De no ser así, los datos se enviarían como texto inteligible.

El servicio de autenticación se integra en el ESCA, que aporta información relativa al contexto de seguridad (p.ej., certificados de claves, información de criptografía para una asociación). Dicho ESCA envía un mensaje a la facilidad de gestión de asociación, que da entonces información acerca del contexto de seguridad.

El ESCA establece una asociación autenticada entre dos procesos de aplicación. La información de autenticación se incluye en los mensajes A-ASSOCIATE por vía de ampliación del campo de información de usuario en los mismos, el cual pasa a contener un certificado de clave y una señal de autenticación para que los dos procesos de aplicación puedan autenticarse mutuamente.

Experiencias en proyecto

Tras los estudios básicos realizados hasta aquí, proseguirá el trabajo de ampliar los servicios ofrecidos por el sistema. Una primera etapa será potenciar las funciones de autorización y control de acceso, introduciendo un servidor de autorización que ofrezca un servicio de autorización de red global. También se proyecta un servicio de auditoría distribuido, materializado en funciones locales que colaboren con un servidor de auditoría.

Conclusiones

Se ha construido un sistema distribuido de seguridad basado en el modelo ISA¹⁵ y en las facilidades de seguridad distribuidas². Hasta aquí las experiencias han demostrado la viabilidad del principio aplicado en los actuales trabajos de normalización interna-

cional, lo que promete la aparición de nuevas normas de seguridad durante los próximos cinco años. Alcatel STK asistirá y contribuirá de modo muy directo a estos trabajos.

Reconocimientos

Los autores expresan su gratitud a los Sres. Å. Skomedal y Ø. Johnsen del Centro de Investigación de Alcatel STK, y al Sr. Ø. Larsen del departamento de investigación de la Administración Noruega de Telecomunicaciones, que han participado en el diseño y realización del sistema experimental, así como al Sr. A. Olaussen de la división de comunicaciones de Alcatel STK, quien ayudó al desarrollo de dicho sistema.

Referencias

- 1 K. Presttun: Medidas de seguridad en redes de comunicación: *Comunicaciones Eléctricas*, 1986, volumen 60, n° 1, págs. 63-70.
- 2 ECMA TR 46 Security in Open Systems: A Security Framework.
- 3 ISO 9594/1-8 (serie X.500 del CCITT) *The Directory*.
- 4 M. J. Bach: The Design of the UNIX Operating System: *Prentice-Hall, Inc*, 1986, Englewood Cliffs, New Jersey 07632, ISBN 0-13-201799-7 025.
- 5 R. L. Rivest, A. Shamir y L. Adleman: A Method for Obtaining Digital Signatures and Public-Key Cryptosystems: *Communications of the Association of Computing Machinery*, febrero 1978, volumen 21, n° 2, págs. 120-126.
- 6 ISO 7498/2 Basic Reference Model, *Security Architecture*.
- 7 ISO 8649/2 (CCITT X.217) *Association Control, Service*.
- 8 ISO 8650/2 (CCITT X.227) *Association Control, Protocol*.
- 9 ISO 8822 (CCITT X.216) *Presentation Service*.
- 10 ISO 8823 (CCITT X.226) *Presentation Protocol*.
- 11 ISO 8571/1-4 *File Transfer Access and Management*.
- 12 ISO 9302/2 (CCITT X.219) *Remote Operations: Model, Notation, and Service*.
- 13 ISO 9303/2 (CCITT X.229) *Remote Operations: Protocol*.
- 14 Data Encryption Standard: *National Bureau of Standards*, FIPS-PUB46, 1977.

- 15 ISO 7498 (CCITT X.200) *Open Systems Interconnection, Basic Reference Model*.
- 16 K. Presttun: Integrating Cryptography in ISDN: *Advances in Cryptology - CRYPTO '87: Proceedings from CRYPTO '87*, agosto 1987, Santa Barbara, California, EE.UU.

Claus Fritzner nació en Oslo en 1960. Se graduó MSc en informática y cibernética por la Universidad Técnica de Trondheim, en 1984. Tras ingresar en Alcatel STK en 1986, El Sr. Fritzner trabajó en diseño de soporte lógico y equipo físico, y en la realización de una tarjeta de ampliación de seguridad para ordenadores personales, que incluía los algoritmos de criptografía DES y RSA. El Sr. Fritzner trabaja actualmente en análisis general de sistemas e integración de la seguridad en los sistemas de comunicación basados en el ISA.

Kåre Presttun nació en Bergen en 1951. En 1979 se graduó MSc en comunicación y electrónica en la Universidad Técnica de Trondheim, ingresando luego en el Centro de Investigación de la Administración Noruega de Telecomunicaciones, donde dirigió el proyecto de teletex protegido y desarrolló tareas relativas a la normalización. Desde 1983 a 1985 participó en la creación de TBK, compañía de sistemas de oficina propiedad de NTA. Durante este periodo trabajó en integración de sistemas y fue director de producto para sistemas de correo de voz y un procesador portátil. Desde 1985 el Sr. Presttun trabaja para Alcatel STK donde es responsable de investigación sobre seguridad de información en aplicaciones no militares. Además es responsable de los proyectos estratégicos de Alcatel para sistemas de información protegida. El Sr. Presttun representa a Noruega en el ISO/IEC/JTC1/SC20.

Jan Tore Richardsen nació en Tromsø, en 1961. Estudió comunicaciones y teoría de la codificación en la Universidad Técnica de Trondheim, graduándose MSc en 1986. El siguiente año ingresó en Alcatel STK donde ha trabajado en obtener el soporte lógico de una placa de ampliación de seguridad para ordenadores personales, con especial interés en el interfaz de usuario. El Sr. Richardsen trabaja actualmente en análisis general de sistemas y seguridad en sistemas de información basados en directorios.

Gunnar Søberg nació en Drammen, en 1960. Tras titularse MSc en informática y cibernética en la Universidad Técnica de Trondheim, en 1984, ingresó al año siguiente en Alcatel STK para trabajar en seguridad de sistemas de información, incluyendo métodos de identificación de personas, seguridad en la comunicación, y realización de sistemas RSA. El Sr. Søberg trabaja actualmente en análisis general de sistemas y arquitecturas de seguridad en sistemas ISA distribuidos, y representa a Alcatel NV en TC29/TGS de ECMA.

Sistemas de transmisión optoelectrónicos de alta velocidad

Se ha desarrollado un prototipo integrado de sistema de transmisión por fibra óptica de 2,24 Gbit/s/115 km para el Bundespost alemán. Se ha probado asimismo en laboratorio la transmisión a 5 Gbit/s sobre 111 km y la modulación de láser a 10 Gbit/s.

R. Heidemann

Centro de Investigación de Alcatel SEL, Stuttgart, República Federal de Alemania

Introducción

Se necesitan sistemas de transmisión por fibra óptica de muy alta velocidad para futuras redes de banda ancha como la RDSI-BA (red digital de servicios integrados de banda ancha) y la RICBA (red integrada de comunicaciones de banda ancha). Tales sistemas, que transmitirán a varios gigabit/s, se utilizarán en enlaces, líneas entre centrales locales de banda ancha y distribución de TV/TVAD (televisión de alta definición). También serán idóneos, tanto técnica como económicamente, en el área de abonado para enlaces de datos de alta velocidad y para la distribución de TV/TVAD, dentro del estudio o entre distintos estudios.

En el Centro de Investigación de Alcatel SEL comenzó a estudiarse en 1980 la transmisión óptica a velocidades de Gbit/s, realizando un sistema de 1,2 Gbit/s que

operaba con 25 km de fibra monomodo. En 1985 se expuso en la Feria de Hannover el primer sistema de 2,24 Gbit/s a 1,3 μm que cubría sin repetidores 53 km^{1,2}. Las mejoras en circuitos integrados de muy alta velocidad (silicio bipolar), láseres y fotodiodos, permitieron desarrollar un prototipo integrado a 1,55 μm que logró en el laboratorio un vano de 115 km con fibra monomodo³, recientemente ampliado hasta 151 km. En julio de 1988, se entregó tal sistema al Centro de Investigación del Bundespost como el primero mundial de 2,24 Gbit/s probado en campo. SEL y Alcatel CIT-ATC desarrollan juntos ahora un sistema de 2,24 Gbit/s para fabricación.

Para allanar el camino a velocidades de transmisión aún más elevadas, el Centro de Investigación de Alcatel SEL expuso en la Feria de Hannover (primavera de 1987) un enlace a 5 Gbit/s sobre 111 km con fibra de

Figura 1
Diagrama de bloques del sistema de transmisión bidireccional de 2240/140 Mbit/s, con multiplexor y demultiplexor de 16 x 140 Mbit/s, transmisor óptico a 1,3 μm , receptor y regenerador.

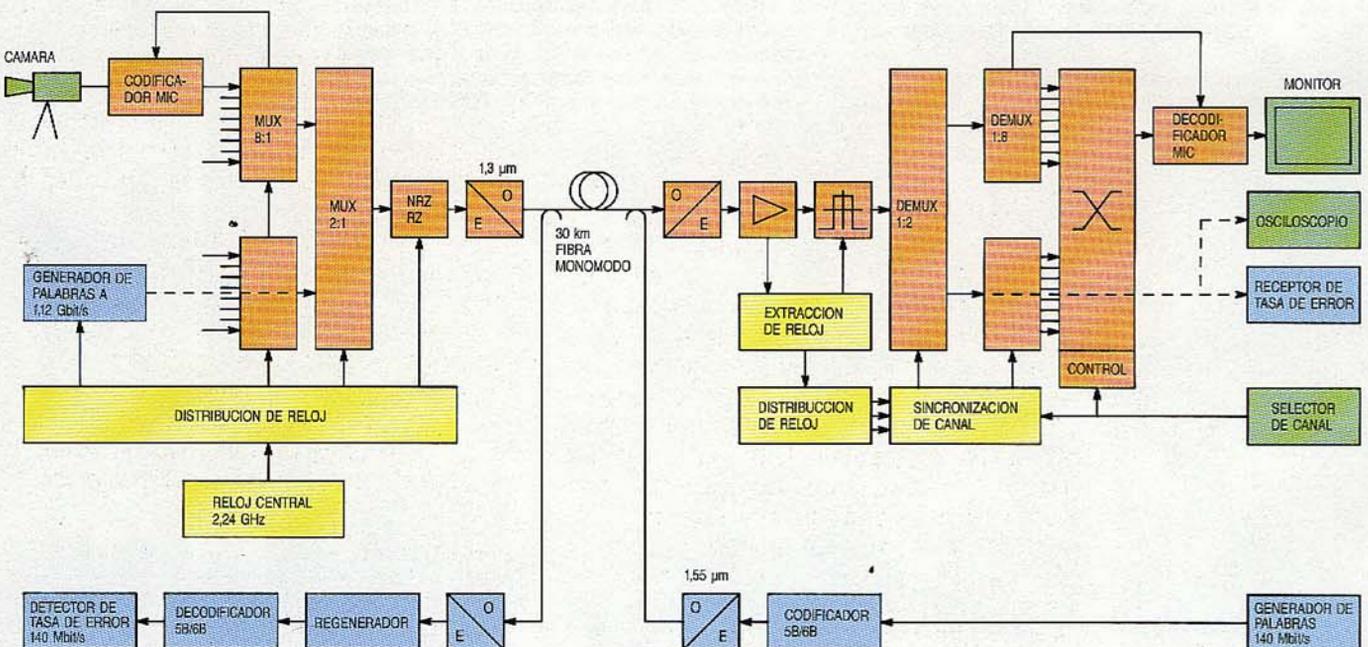
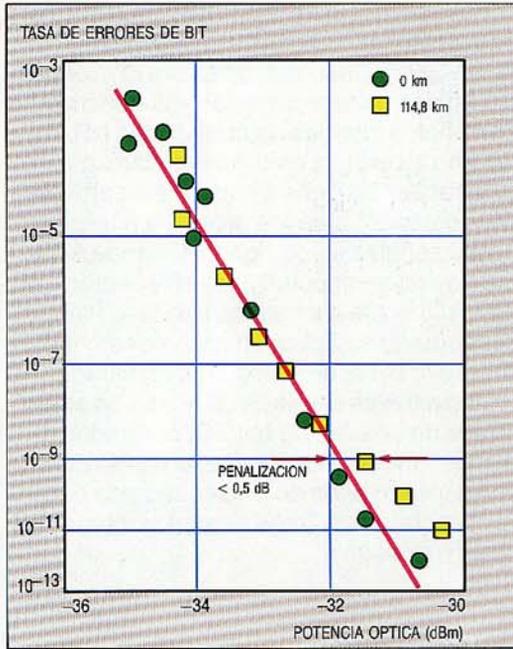


Figura 2
Característica de tasa de errores de bit de la transmisión a 2,24 Gbit/s y 1,55 μm sobre 115 km de fibra monomodo normalizada, demostrando cómo se reduce la penalización debida a la dispersión y fluctuación de longitud de onda optimizando la corriente de excitación del láser.



punto de dispersión mínima desplazado^{4,5}. Las primeras experiencias de modulación de láser a 10 Gbit/s fueron en otoño de 1987 y se presentaron en la Revisión Tecnológica de Alcatel, en Stuttgart⁶.

Sistemas de 2,24 Gbit/s

La figura 1 es el diagrama de bloques de un sistema bidireccional capaz de transmitir en un sentido 16 canales de 140 Mbit/s multiplexados por división de tiempo, más un canal de 140 Mbit/s en sentido opuesto¹. La parte de alta velocidad de este sistema de 2,24 Gbit/s consta de multiplexor y demultiplexor electrónico, además de transmisor óptico, receptor óptico, y regenerador de señal con extracción de reloj y circuito de decisión incluidos.

Transmisor y receptor ópticos

Estas unidades son los interfaces entre los circuitos electrónicos de alta velocidad y el enlace de fibra óptica. Dos fenómenos básicos limitan el producto velocidad binaria por distancia obtenible en enlaces de fibras ópticas monomodo: la atenuación y la dispersión cromática de la fibra. La primera reduce la amplitud de la señal óptica, en un valor fácil de calcular. En cambio, la dispersión de la fibra produce efectos mucho más complejos, principalmente la fluctuación de la longitud de onda del láser (variación de esta longitud de onda cuando el láser conmuta emisión/no emisión), el ruido del láser y el salto modal que causa la realimentación óptica⁷, y el ruido de partición de modos resultante de una supresión imper-

fecta de los modos laterales del espectro de un láser monomodo. De no poder anular tales efectos, el diseñador habrá de contar con una penalización (calculada en dB) que incluirá en el balance de potencia óptica.

La dispersión causa su máximo perjuicio al utilizar un láser a 1550 nm con fibra monomodo estándar, cuya longitud de onda para dispersión nula se aproxime a los 1300 nm pero que alrededor de 1550 nm presente un coeficiente de dispersión alto, hasta de 20 ps/nm.km. Siendo esta combinación atractiva en cuanto a la atenuación de la fibra (a 1550 nm es sólo la mitad que a 1300 nm) y al coste — permite utilizar fibras estándar ya instaladas —, el Centro de Investigación se ha dedicado a solucionar los problemas señalados. La realimentación óptica puede controlarse con relativa facilidad empleando un conector óptico de alta calidad (baja reflectividad) en el transmisor, y el ruido de partición modal se reduce al mínimo eligiendo con cuidado el láser. Medidas y cálculos recientes demuestran que la fluctuación de longitud de onda dinámica remanente crea una fuerte penalización por dispersión, hasta 10 dB en un enlace de 100 km.

Las mediciones en el espectro del láser mediante una cámara de trazos*, demostrando que la potencia óptica depende del tiempo y de la longitud de onda, y las simulaciones basadas en las ecuaciones del láser — que describen la evolución en el tiempo de las densidades de portadores y fotones dentro del dispositivo —, culminaron en el diseño de un circuito excitador láser que suprime la fluctuación de longitud de onda conformando los impulsos de la corriente de excitación⁹. Con este nuevo circuito se ha medido la tasa de errores de bit en diferentes enlaces de fibra, al objeto de comprobar sus ventajas. Como se aprecia en la figura 2, la penalización por dispersión remanente se mantiene inferior a 0,5 dB, incluso con 115 km de fibra estándar cuya dispersión total alcanza los 2 ns/nm a la longitud de onda láser de 1550 nm^{8,9}. Estos resultados son habituales y se han conseguido con láseres DFB de serie.

La tabla 1 muestra el balance final de potencia calculado para este enlace, junto con los datos esenciales del transmisor y del receptor ópticos, demostrando que es fácil salvar vanos de más de 100 km si se utilizan componentes optoelectrónicos avanzados y proceso de señal de alta velocidad. El vano de 40 km que exigen numerosas Administraciones puede cubrirse con

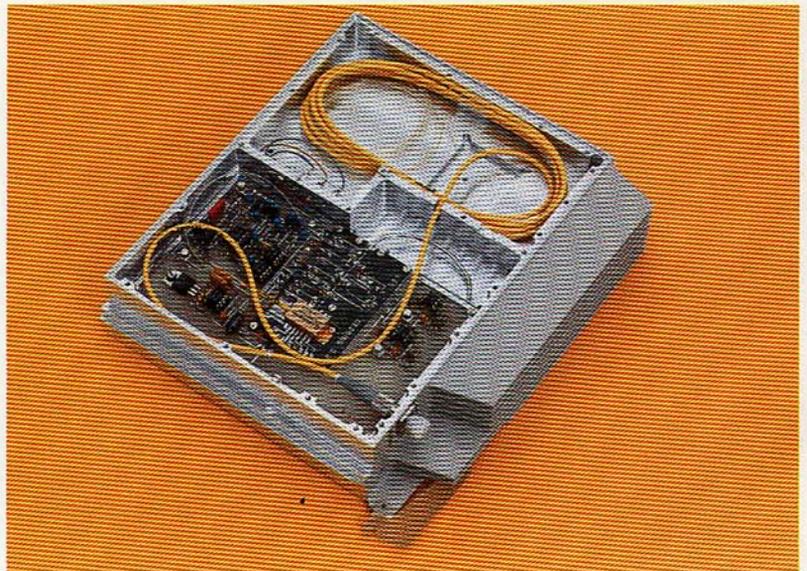
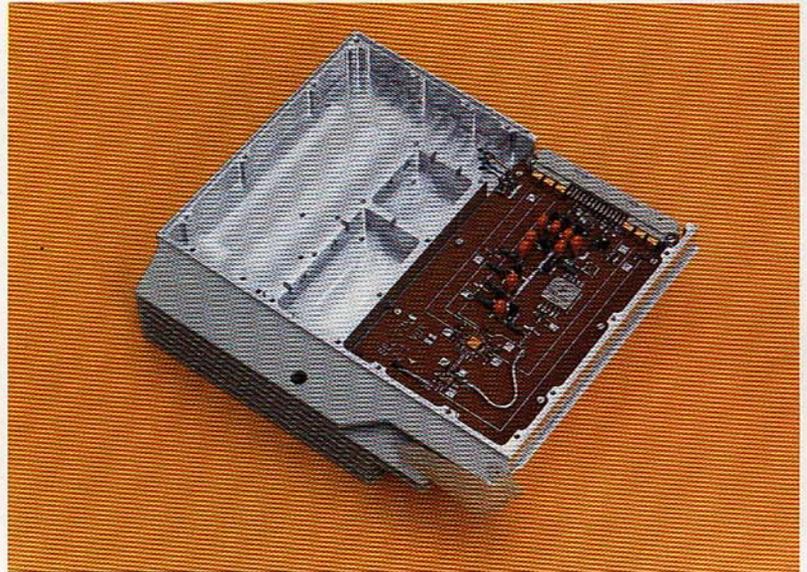
* Equipo de prueba optoelectrónico utilizado para caracterizar señales ópticas. La potencia óptica puede medirse simultáneamente en función del tiempo y de la longitud de onda. Los mejores factores de calidad logrados son una resolución temporal de 5 ps y espacial de 0,3 nm.

Tabla 1 – Características principales del sistema

<i>Transmisor</i>	
Diodo láser	InGaAs de DFB
Longitud de onda	1550 nm
Formato de modulación	NRZ
Potencia media de salida	-2,6 dBm
Tiempo de subida/bajada	150 ps
Conector de fibra óptica monomodo	Seiko PC
<i>Receptor</i>	
Fotodetector	APD de InGaAs
Amplificador	Transimpedancia
Sensibilidad	-31,1 dBm (BER = 10^{-9} , PRBS de $2^{23}-1$)
Ancho de banda	50 kHz ... 1,4 GHz
Margen dinámico	15 dB
Conector de fibra óptica monomodo	Seiko PC
<i>Enlace de fibra óptica</i>	
<i>1 Experiencia de laboratorio</i>	
Atenuación de la fibra a 1550 nm	0,24 dB/km
Dispersión de la fibra a 1550 nm	17 ps/nm.km
Longitud total del enlace	115 km
Máxima longitud de enlace demostrada con fibras optimizadas	151 km
Tasa de errores de bit	$\leq 10^{-10}$
<i>2 Pruebas de campo, Bundespost, Berlín</i>	
Atenuación de la fibra a 1550 nm	0,40 dB/km
Dispersión de la fibra a 1550 nm	24,5 ps/nm.km
Longitud total del enlace	36 km
Margen del sistema	14 dB
Tasa de errores de bit	$\leq 10^{-16}$

Este circuito de resincronización requiere una señal de reloj de alta calidad (2,24 GHz). Dado que no existe raya espectral en esa frecuencia durante la transmisión de señales binarias no codificadas NRZ (sin retorno a cero), la energía espectral para esa frecuencia debe generarse a partir del propio espectro de los datos – a diferencia de las señales de código CMI donde siempre hay raya espectral pero el receptor necesita doble anchura de banda –. Para conseguirlo se aplica un preproceso no lineal a la señal de datos, tras un filtrado previo a través de filtros de líneas de cinta o trozos de coaxial, de bajo Q, centrados a $0,5 f_{reloj}$. En dicho preproceso han sido útiles los circuitos de onda cuadrada con FET discretos de GaAs o puertas integradas de OR-exclusivo.

Sistema de 2,24 Gbit/s para pruebas de campo: caja del transmisor con multiplexor integrado (arriba), módulo láser, excitador del láser y control del láser (abajo).



sistemas de 1,3 μ m, ya que la atenuación en la segunda ventana es suficientemente baja.

Regenerador de señal

Su finalidad principal es resincronizar y restaurar la trama de bits que procede de la parte analógica del receptor óptico (entrada óptica y amplificador principal de ganancia controlada). En principio, resincronizar implica suprimir toda fluctuación de fase creada por imperfecciones de los tramos anteriores del enlace óptico, y después restaurar la duración del bit ($\tau_B = 446$ ps a 2,24 Gbit/s). Los principales efectos que hacen ensanchar los impulsos, y por tanto crean interferencia entre símbolos, son la fluctuación de longitud de onda del láser unida a la dispersión de la fibra, y la limitada frecuencia de corte superior (filtro paso bajo) de los circuitos analógicos del receptor, en particular de su etapa de entrada.

En la práctica hay tres alternativas básicas para el filtro principal de alto Q:

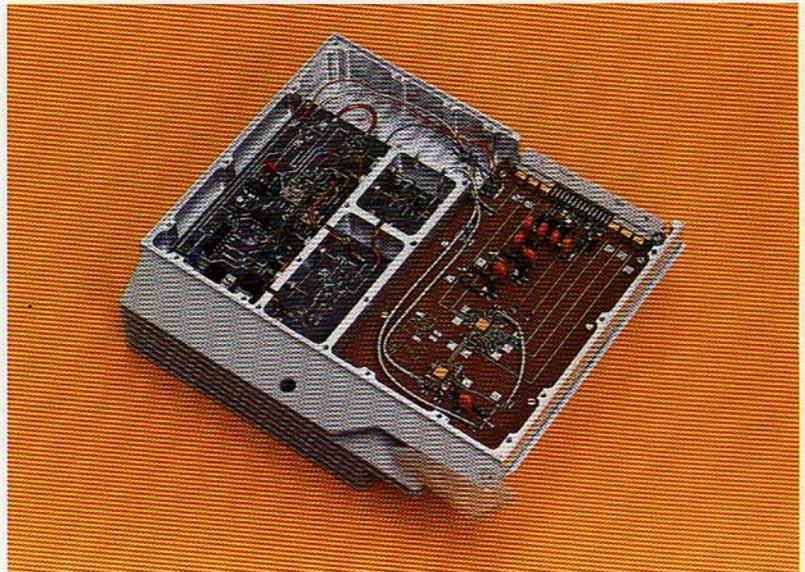
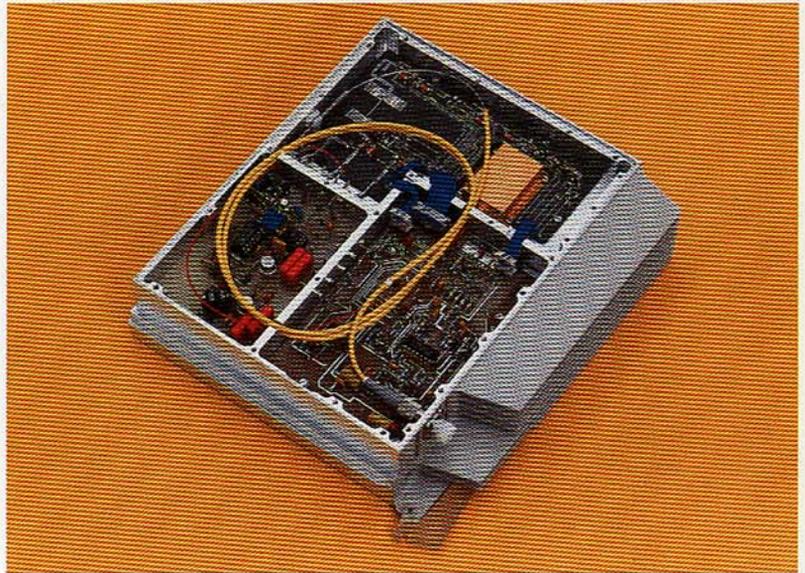
- filtro pasivo con resonador dieléctrico
- filtro pasivo con un dispositivo de onda acústica superficial
- filtro con bucle de enganche de fase.

Todas ellas se han probado con éxito en SEL. No obstante, el filtro con resonador dieléctrico a 2,24 GHz resulta demasiado voluminoso (material dieléctrico con $\epsilon \sim 37$) para uso en productos futuros. La extracción de reloj por bucle de enganche de fase es seguramente la solución más flexible pues admite especificaciones variables (p.ej., en el comportamiento de la frecuencia frente a la fluctuación de fase) aún no concretadas. Se ha desarrollado una nueva pastilla de regenerador, con un filtro de onda acústica de superficie anexo al circuito integrado de extracción de reloj.

El segundo bloque en importancia del regenerador de señal es el circuito de decisión, que en principio es un biestable tipo D sincronizado por la señal de 2,24 GHz. Los factores de calidad relevantes son la ambigüedad en la decisión respecto a la amplitud y el margen de fase de la señal de reloj. El primero describe la mínima abertura vertical del ojo requerida en la entrada de datos para trabajar sin errores, mientras que el segundo se corresponde con la mínima abertura horizontal del ojo para ese mismo propósito. Se ha elaborado un circuito de decisión integrado en silicio bipolar para operar hasta en 2,9 Gbit/s¹⁰, con una ambigüedad de decisión de amplitud o sensibilidad de entrada de 5 mV_{pp} (margen dinámico de 5 mV_{pp} a 1 V_{pp}), resultado de la alta sensibilidad del detector de umbral de entrada. El riguroso diseño del biestable D da lugar a un margen de fase de 303° en la señal de reloj. Ambos valores, medidos a 2,24 Gbit/s, son los más avanzados del mundo entero. Durante el diseño del circuito integrado se cuidó mucho de desacoplar sus diversos bloques funcionales (detector del umbral de entrada, biestable D, amplificador separador de entrada del reloj, circuito de salida de datos), merced a una adecuada ubicación en la pastilla. Además, las distintas tensiones internas de polarización y la externa de alimentación ($V_{EE} = -5$ V) se han desacoplado mediante condensadores integrados en la pastilla, por lo que se pudo obtener, en cada puerto, un aislamiento de 46 dB de datos a reloj y viceversa, con la pastilla en encapsulado plano normal sobre placa de circuito impreso.

Multiplexor y demultiplexor electrónicos

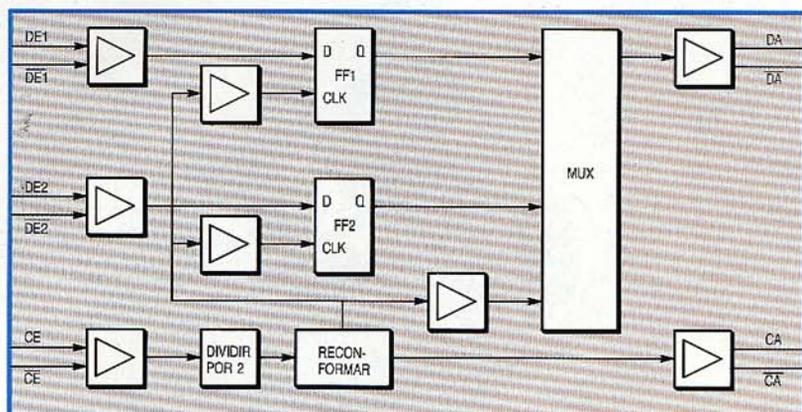
Cuando el Centro de Investigación de SEL comenzó en 1985 a trabajar en multiplexo-



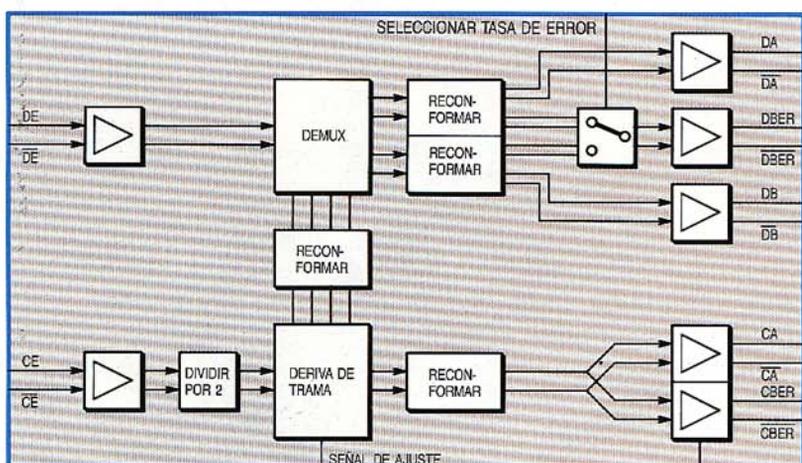
Sistema de 2,24 Gbit/s para pruebas de campo: caja del receptor con etapa de entrada, amplificador principal con CAG, circuito CAG y alimentación del APD (arriba), y extracción de reloj, regenerador y demultiplexor (abajo).

res y demultiplexores de 2,24 Gbit/s, todos los circuitos habían de formarse con componentes discretos. Pronto se demostró que tales unidades nunca podrían fabricarse en cantidad y a costes competitivos, por lo cual hubo que desarrollar pastillas en tecnología bipolar de silicio avanzada. Se prefirió el silicio al arseniuro de galio porque las simulaciones y mediciones sobre los primeros circuitos integrados revelaron claramente que el silicio es satisfactorio, e incluso ventajoso, para operar hasta los 3 Gbit/s. Sólo si se necesitara inmunidad a las radiaciones podría preferirse la tecnología de arseniuro de galio.

Con miras a demostrar las posibilidades de la tecnología bipolar de silicio en otros circuitos, se han desarrollado las partes de alta velocidad del multiplexor y demultiplexor de 16 canales (16×140 Mbit/s = 2,24 Gbit/s), circuitos



VELOCIDAD BINARIA MÁXIMA 2,6 Gbit/s
 DA: SALIDA DE DATOS 2,2 Gbit/s, 0,8 V_{pp}, 50 Ω, COLECTOR ABIERTO
 FLUCTUACIÓN DE DATOS NO MAYOR DE 40 ps
 DE: ENTRADA DE DATOS 1,1 Gbit/s, 0,2-1,0 V_{pp}, 50 Ω A -2 V O TIERRA
 ALIMENTACIÓN -5,0 V A 350 mA
 CE: ENTRADA DE RELOJ; CA: SALIDA DE RELOJ



MÁXIMA VELOCIDAD BINARIA 2,6 Gbit/s
 SALIDA DE DATOS 1,1 Gbit/s (x 3), 0,8 V_{pp}, ECL
 FLUCTUACIÓN DE DATOS NO MAYOR DE 40 ps
 ENTRADA DE DATOS 2,2 Gbit/s, 0,2-1,0 V_{pp}, 50 Ω
 ALIMENTACIÓN -5,0 V A 400 mA

Figura 3
 Diagramas de bloques simplificados de multiplexor bipolar de silicio 2:1 (arriba), demultiplexor 1:2 (abajo), ambas pastillas utilizadas en el sistema de transmisión óptica de 2,24 Gbit/s.

integrados que encajan directamente en el sistema de transmisión de la figura 1. La figura 3 muestra las pastillas en silicio bipolar del multiplexor 2:1 y demultiplexor 1:2 del sistema de 2,24 Gbit/s.

Los resultados experimentales de los circuitos integrados multiplexor, demultiplexor y regenerador demuestran que la tecno-

logía avanzada bipolar de silicio es adecuada¹⁰ desde 2,2 hasta 2,5 Gbit/s.

Sistema de pruebas de campo de 2,24 Gbit/s

Utilizando estos componentes, se ha instalado un sistema para pruebas de campo en el Centro de Investigación del Bundespost en Berlín. Para probarlo fácilmente (midiendo tasa de errores de bit con equipo estándar, por ejemplo), se emplearon dos interfaces de entrada y salida a 1,12 Gbit/s con señal de reloj asociada de 1,12 GHz, en vez del interfaz completo a 2,24 Gbit/s. Por consiguiente, el transmisor óptico (véase la tabla 1) consistía en un multiplexor 2:1, el circuito excitador del láser y el circuito de control del láser. La caja del receptor óptico alojaba la etapa de entrada al receptor, el amplificador principal, el control automático de ganancia, la alimentación del fotodiodo de avalancha con su control, el regenerador con circuito de decisión y extracción de reloj, y el demultiplexor 1:2. Sus características funcionales se describen en la tabla 1.

Durante el desarrollo, se utilizaron en todo lo posible materiales y técnicas de bajo coste; así, en la entrada al receptor, solamente transistores encapsulados soldados a un sustrato de teflón, sin tener que recurrir a pastillas soldadas a híbridos de película delgada. Se empleó sustrato estándar de teflón en todos los circuitos analógicos de alta velocidad: el excitador del láser, el amplificador principal, la extracción del reloj, y el oscilador controlado por tensión. Los circuitos digitales que comprenden las pastillas del multiplexor y del circuito de decisión se realizaron en placas de circuito impreso, con material epóxido FR4 de seis capas, económico. Aun con las técnicas descritas, se pudo conseguir un vano de 151 km.

Experiencias a 5 y 10 Gbit/s

En todo el mundo se procura explotar la enorme anchura de banda de las fibras

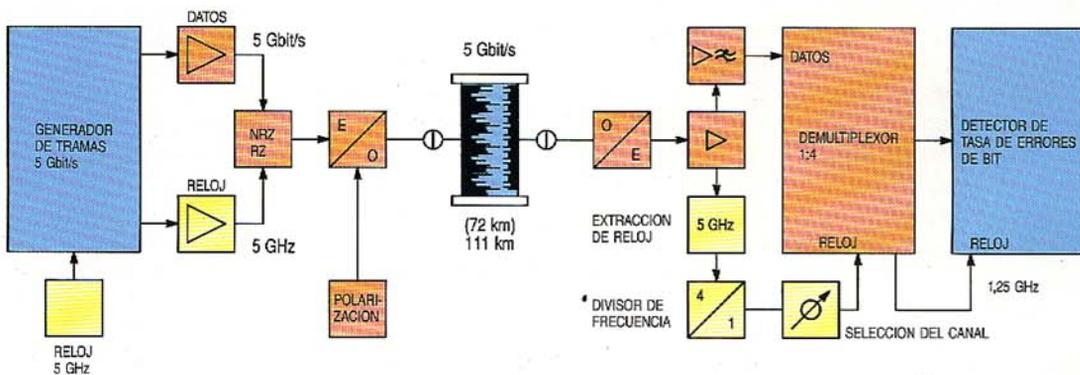
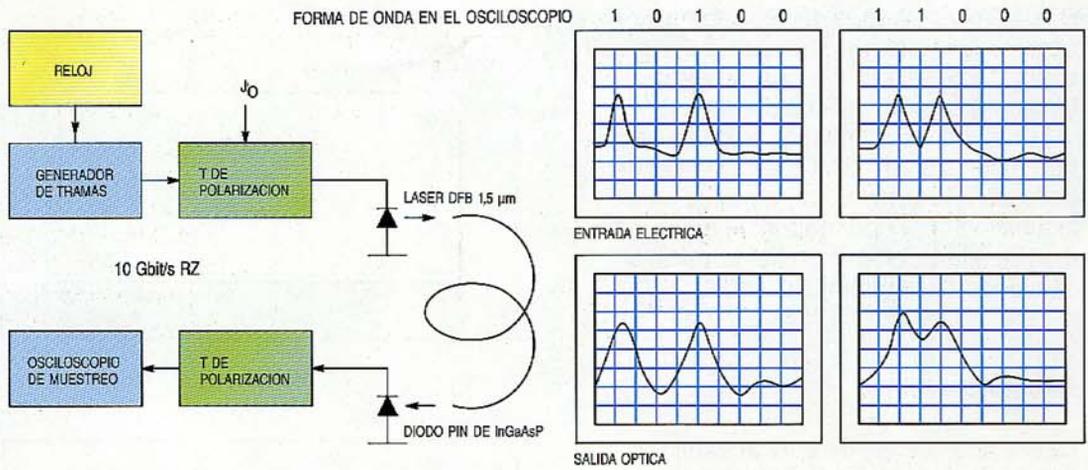


Figura 4
 Diagrama de bloques del sistema de transmisión de 5 Gbit/s sobre 111 km.

Figura 5
Diagrama de bloques y formas de onda en el osciloscopio obtenidas en la experiencia de modulación del láser a 10 Gbit/s.



ópticas monomodo, mediante la optimización de los componentes optoelectrónicos y electrónicos. En la primavera de 1987, el Centro de Investigación de Alcatel SEL preparó un modelo de sistema de transmisión de 5 Gbit/s, capaz de cubrir 111 km sin repetidores, que lograba el excelente valor de 555 Gbit/s.km para el producto velocidad binaria por distancia, con una tasa de errores de bit menor de 10^{-9} .

La figura 4 es un diagrama de bloques del sistema de SEL. Dado que actualmente no hay casi ningún circuito integrado para esa velocidad binaria/frecuencia, a excepción de la pastilla bipolar de silicio del divisor de frecuencia de 5 GHz, todos los circuitos electrónicos del sistema utilizan componentes discretos⁴. Pese a la buena calidad de transmisión obtenida (tasa de error inferior a 10^{-9} , por ejemplo), está claro que la estrategia aplicada en el desarrollo en 2 Gbit/s debe extenderse al desarrollo de sistemas de 5 y 10 Gbit/s. Así, todas las funciones electrónicas deben realizarse con el mayor índice de integración posible. Los simulaciones iniciales y los primeros resultados experimentales publicados en Alemania y Japón indican que las funciones digitales puras se materializarán en tecnología bipolar de silicio. Aunque la tecnología MESFET de GaAs podría ser suficiente para funciones analógicas de pequeña señal (amplificador principal), los HBT de GaAs (heterotransistores bipolares de arseniuro de galio) ó HEMT (transistores de electrones de alta movilidad) serán la solución óptima para circuitos críticos — como el circuito de decisión — o de corrientes intensas (caso del excitador del láser). Como todas estas tecnologías están despuntando hoy, se podría tener un sistema prototipo de 10 Gbit/s al iniciar los 90.

Es factible hoy el modular láseres DFB (de realimentación distribuida) a 1550 nm con señales de datos a 10 Gbit/s, como indica la figura 5. En ella se aprecia la señal

eléctrica de excitación con retorno a cero y la correspondiente salida óptica, detectada en un diodo PIN de InGaAs de SEL. La capacidad de excitación del láser, así como la calidad óptica espectral, deben no obstante mejorar notablemente en el futuro.

A velocidades de transmisión tan altas, podría incluso resultar factible aprovechar los efectos de la dispersión en las fibras. Suponiendo que tanto la longitud de onda de operación como sus variaciones con la corriente de excitación (fluctuación) se logren estabilizar en toda la vida útil del láser y su sistema asociado, podrá utilizarse la compresión de impulsos ópticos para evitar el ensanchamiento de los impulsos y por tanto la interferencia entre símbolos en el receptor óptico. En el Centro de Investigación de Alcatel SEL se han obtenido ya los primeros resultados experimentales de este método supresor de la dispersión. La figura 6a muestra la señal óptica original a la salida del transmisor óptico de 5 Gbit/s, con impulsos de anchura 81 ps. Después de transmitirse por 111,2 km de fibra monomodo con el cero de dispersión desplazado, la anchura se queda en 19 ps (Fig. 6b), pues la fibra tiene un coeficiente negativo de dispersión de -1 ps/nm.km a la longitud de onda del láser, 1536 nm. Si se añadiera fibra con dispersión positiva a este enlace, el impulso volvería a ensancharse, y además se atenuaría.

Conclusiones

Se ha desarrollado un prototipo de sistema de 2,24 Gbit/s que opera en la tercera ventana a 1,55 μ m, en el cual todas las funciones digitales se han materializado en tecnología bipolar de silicio. Este sistema se entregó después al Bundespost alemán para verificar pruebas de campo. Se ha probado ya con éxito la pastilla bipolar de silicio del amplificador principal ($G = 47$ dB,

$B = 4$ Gbit/s). A fines de 1988, la función de sistema restante (la extracción de reloj) se realizó también en circuitos integrados bipolares de silicio a medida.

Los primeros resultados experimentales obtenidos a 5 y 10 Gbit/s en longitud de onda de $1,55 \mu\text{m}$ demuestran que será factible construir prototipos de estos sistemas de alta velocidad de transmisión al comienzo de la próxima década.

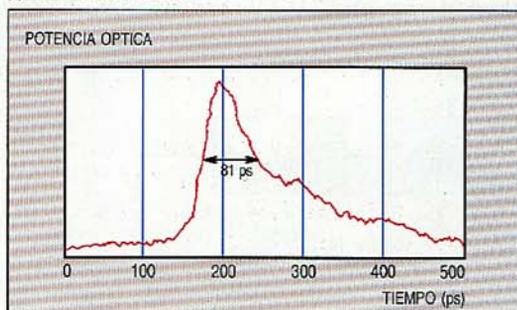
Reconocimiento

La actividad objeto de este artículo fue financiada parcialmente por el BMFT (Ministerio de Investigación y Tecnología) de la República Federal de Alemania.

Referencias

1. R. Heidemann: 16×140 Mbit/s Time Division Multiplexed Transmission Over 53 km Single Mode Fiber: *Proceedings EFOC/LAN 87*, Basilea, págs. 59-62.
2. R. Heidemann, I.M. Nobre y V. Quilez: 2240/140 Mbit/s Bidirectional WDM Transmission Demonstration for Broadband Subscriber System: *Proceedings ECOC 86*, Barcelona, España, págs. 25-28.
3. B. Wedding: Reduction of Bit Error Rate in High Speed Optical Transmission Systems due to Optimized Electrical Drive Pulse Shaping: *Proceedings of ECOC 88*, Brighton, págs. 187-190.
4. R. Heidemann, R. Scholz y B. Wedding: 5 Gbit/s Transmission System Experiment Over 111 km of Optical Fiber: *Electronic Lett*, 1987, 23, págs. 1030-1031.
5. R. Heidemann: High Performance Optical Transmission and the Laser/Photodetector Characteristics: *Proceedings ICL 87*, Xiamen, China, pág. 284.
6. R. Heidemann y B. Wedding: Future High Bitrate Transmission Systems: *Proceedings ANV Technology Review Meeting*, Stuttgart, 1987.
7. D. Schlump y B. Wedding: Effect of Optical Feedback on Bit-Error-Rate in Dispersive Fiber Transmission Systems: *Proceedings OFC 88*, Nueva Orleans, EE.UU., pág. 151.
8. R. Heidemann y B. Wedding: Dispersion Penalties in a 5 Gbit/s Optical Transmission System Using

(a) 0 km DE FIBRA OPTICA



(b) 111,2 km DE FIBRA OPTICA

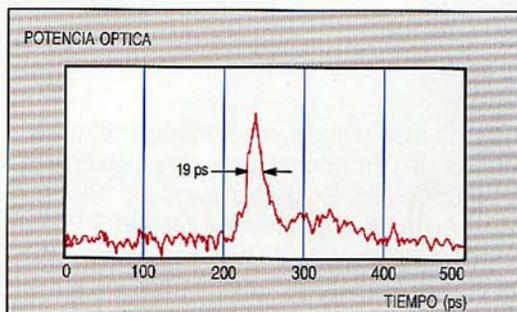


Figura 6
Demostración de la compresión de impulsos ópticos de 5 Gbit/s desde 81 ps a 19 ps al atravesar 111 km de fibra monomodo con coeficiente de dispersión negativa, obtenido por la adecuada sintonización de la longitud de onda del láser.

Directly Modulated DFB-Laser: *Proceedings EFOC/LAN 88*, Amsterdam.

9. R. Heidemann: Investigations on the Dominant Dispersion Penalties Occurring in Multigigabit Direct Detection Systems: *Journal of Lightwave Technology*, 1988, volumen LT-6, n° 11, págs. 1693-1697.
10. E. Gerhard, R. Heidemann, E. Schlag, D. Suikat y U. Willrett: Anwendungsorientierte integrierte Silizium-Bipolar Schaltungen für ein 2,4 Gbit/s Laborsystem: *Aceptado para publicación en Proceedings ITG Conference*, Berlin, 1988.

Rolf Heidemann se graduó Dipl-Ing y Dr-Ing en física por la Universidad Westfälische Wilhelms, Munster, en 1976 y 1983, respectivamente. Desde 1978 a 1983 fue investigador colaborador en el Instituto de Física Aplicada de Munster. El Sr. Heidemann entró en el Centro de Investigación de SEL en 1983, siendo desde 1985 el responsable del departamento de comunicaciones por fibras ópticas.

Red experimental BERKOM y concepto de RDSI-BA con distribución de TV

El primer sistema de conmutación y transmisión RDSI-BA es operacional en la red experimental BERKOM, proporcionando servicios de RDSI, y los de banda ancha a 2 Mbit/s y a 140 Mbit/s. El sistema desarrollado por Alcatel SEL se apoya en las últimas técnicas de VLSI y de transmisión por fibra óptica.

G. Domann

Centro de Investigación de Alcatel SEL,
Stuttgart, República Federal de Alemania

Introducción

En los dos últimos años se advierte mundialmente una gran expansión de los estudios y realizaciones de sistemas de comunicación de banda ancha, que han cristalizado en pruebas de campo en Estados Unidos, Japón, Francia y Alemania. Las actividades europeas están respaldadas por el programa RACE para desarrollo de una red integrada de comunicaciones en banda ancha (RICBA), futuro sistema de conmutación y transmisión digital. Este desarrollo ha sido provocado por el notable progreso técnico logrado en los componentes ópticos esenciales, que asimismo ha permitido reducir costes, y por el rápido avance de la tecnología VLSI, particularmente en velocidad, complejidad y fiabilidad.

La relación eficacia/coste de la tecnología de fibra óptica ha sido probada en muchas aplicaciones, y sobre todo en líneas de enlaces digitales, sistemas de transmisión de TV y cables transoceánicos. No obstante, quedan problemas económicos por superar antes de suministrar centrales y bucles de abonado de banda ancha a los bajos precios requeridos para una aplicación masiva. Con tal motivo, SEL lanzó en 1985 un programa de investigación dirigido a definir y desarrollar un sistema RDSI de banda ancha que utilizara las tecnologías más avanzadas para alcanzar los objetivos siguientes:

- acceso de banda ancha universal para servicios de banda estrecha y banda ancha, ampliando el principio RDSI
- provisión de un escenario de introducción evolutivo para servicios de banda ancha basados en equipos modulares
- estrategia de introducción general que tenga en cuenta no sólo las diferentes aplicaciones, como comunicaciones

privadas y de empresa, sino también la diferente situación inicial de cada país

- unas prestaciones de los componentes del sistema que permitan su utilización en aplicaciones de gran escala
- una realización de tales componentes que finalmente haga factible ofrecer acceso en banda ancha, a precio aproximadamente doble del actual servicio telefónico.

El cumplimiento de todos estos requisitos sentaría las bases para la introducción generalizada de comunicaciones en banda ancha.

El proyecto de investigación se ha realizado en dos etapas:

Etapas 1: modelo funcional. El sistema utiliza tecnología VLSI para demostrar las funciones más críticas, y ofrece servicios de conversación en banda estrecha (RDSI) y en banda ancha. Tras su prueba al final de 1987, se instaló este sistema en la red experimental BERKOM.

Etapas 2: sistema de laboratorio RDSI-BA. Basado en la experiencia adquirida con el modelo funcional, se diseñó un sistema de laboratorio con circuitos electrónicos de alto índice de integración y mejor soporte lógico, que además proporciona servicios de distribución. Todos los componentes utilizados están concebidos para alcanzar la meta de coste fijada. El sistema, en avanzado desarrollo, debe estar preparado a mediados de 1989.

Red experimental BERKOM

*BERKOM (BERliner KOMmunikations-system) es un proyecto piloto destinado a promover nuevos servicios, aplicaciones y

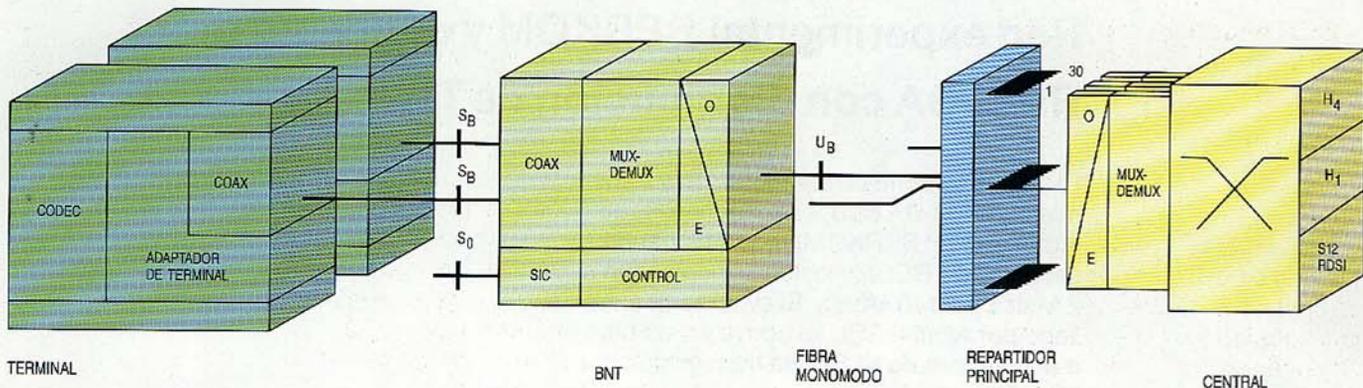


Figura 1
Diagrama de bloques de la red experimental RDSI-BA de BERKOM.

sistemas de usuario final de telecomunicaciones para la RDSI-BA. Lo inició en 1986 el Deutsche Bundespost, el Senado de Berlín y la industria alemana. Con una inversión de más de 150 MECU, es el mayor proyecto mundial de RDSI-BA. Alcatel SEL ha sido la primera en entregar un sistema operativo, desde marzo de 1988, para la red experimental BERKOM.

El objetivo principal es concebir una red global apoyada en los principios de RDSI¹. Además de la arquitectura de la red, el proyecto abarca los protocolos, las nuevas técnicas de aplicación y los sistemas de usuario, y al mismo tiempo presta soporte a "proyectos de demostración" orientados a mejorar los sistemas de usuario final de banda ancha, como son los terminales de videoteléfono, estaciones de trabajo, PABX y RAL (redes de área local). Estos proyectos cubren una extensa gama: videotelefonía, telemedicina, telepublicidad, distribución de vídeo, extracción de datos a gran velocidad, CIM (fabricación integrada por ordena-

dor) y comunicación documental en soporte múltiple². La mayoría de estas actividades han comenzado ya y su terminación se prevé para finales de 1991.

Características del sistema

La figura 1 muestra la red experimental BERKOM desarrollada por SEL, la cual presenta las siguientes características:

- estructura en estrella
- operación síncrona
- carácter totalmente digital
- conmutación de circuitos
- base en la RDSI
- señalización por protocolo de canal D
- canales de banda ancha de 140 Mbit/s y 2 Mbit/s

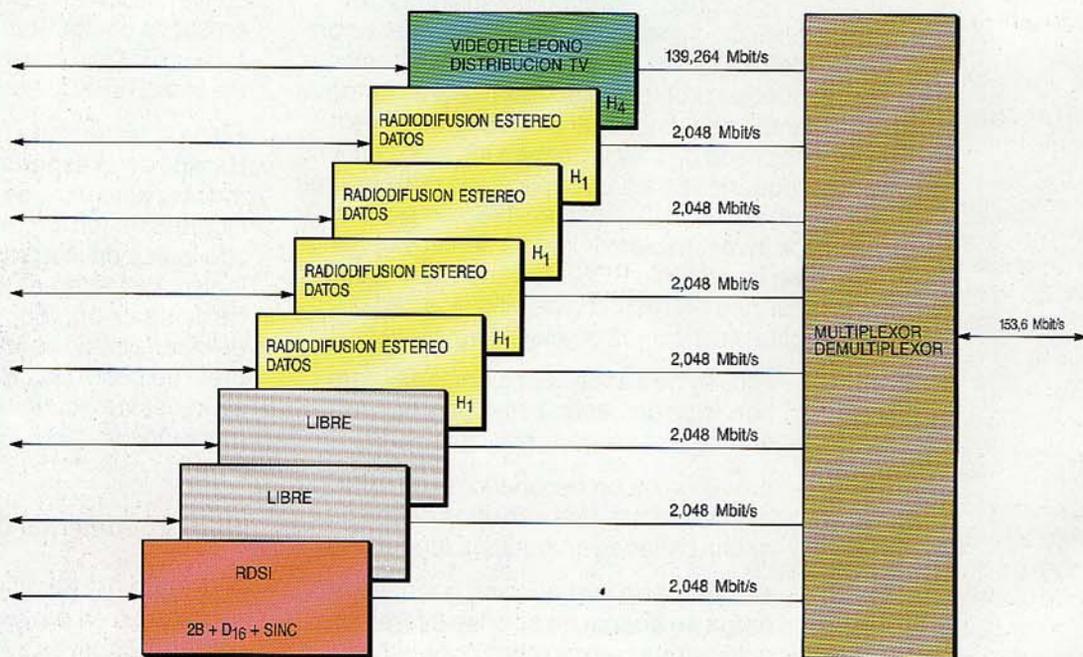


Figura 2
Estructura de canales del multiplexor/demultiplexor de servicios en la trama básica.

- MDT (multiplexación por distribución en el tiempo) de canales
- configuración de estrella física/bus lógico en la red de banda ancha del domicilio del abonado.

Central de banda ancha

La figura 1 describe el sistema completo cuyo núcleo es la central Sistema 12 RDSI, de configuración idéntica a la central Sistema 12 utilizada en la red experimental RDSI del Bundespost en 1987. Las matrices de conmutación adicionales que admiten las velocidades de 2 Mbit/s y 140 Mbit/s están gobernadas por la central Sistema 12, lo cual no sólo garantiza la compatibilidad con la RDSI sino que además facilita añadir servicios de banda ancha a las centrales RDSI de banda estrecha.

El módulo principal en banda ancha es una matriz de conmutación espacial de 16 entradas y 16 salidas, diseñada por Alcatel SEL en tecnología CMOS de 2 μm^3 . Se ha realizado ya una versión con funciones ampliadas en una tecnología más rápida, de 1,5 μm .

Disponiendo un conjunto de 12 circuitos VLSI en una estructura de tres etapas se ha conseguido realizar un conmutador de grupo con baja probabilidad de bloqueo, provisto de 64 entradas y 64 salidas. Para atender a los 30 abonados de la red experimental BERKOM, se conectan dos conmutadores de acceso (de 64 x 64 cada uno) a un solo conmutador de grupo del mismo tamaño. El conmutador de banda ancha está sincronizado por una señal de 139,264 MHz de baja fluctuación, la cual se obtiene o bien del reloj de los enlaces entre centrales de esa misma frecuencia, o bien del reloj de 8 MHz del Sistema 12. El sistema de reloj completo está duplicado para asegurar la máxima fiabilidad del sistema.

El equipo de la central de banda ancha se muestra en la fotografía contigua (bastidor de la izquierda). Las placas de generación y distribución de reloj se alojan en los cuadros de abajo, y los conmutadores de 140 Mbit/s y 2 Mbit/s se sitúan junto con las placas del multiplexor en los tres cuadros superiores.

Las señales que van y vienen entre los distintos conmutadores se multiplexan y demultiplexan eléctricamente según la estructura de canal siguiente (Fig. 2):

$$H_4 + 4 \times H_1 + 2B + D_{16}$$

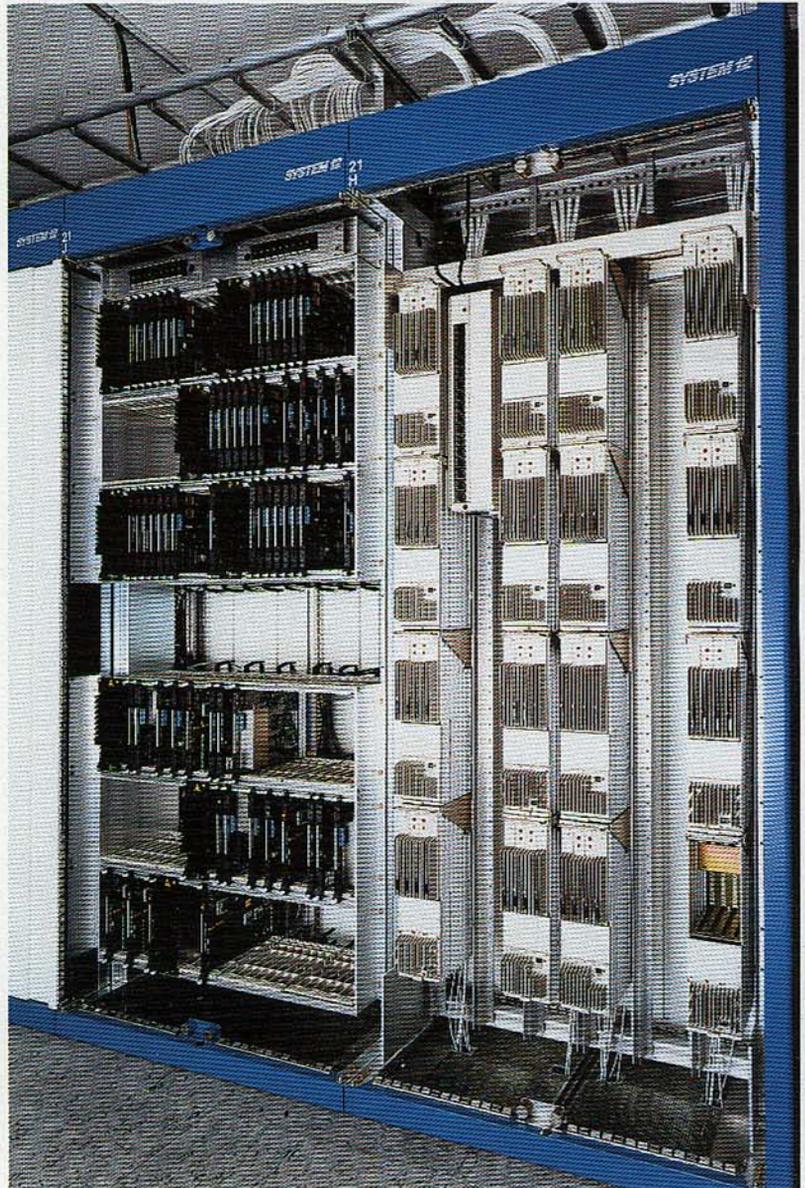
La trama básica así creada tiene una velocidad binaria bruta de 153 600 kbit/s. La mayor parte de la trama la ocupa el canal H_4 , con velocidad binaria bruta de 139 264 kbit/s y neta de 135 168 kbit/s. Esta capacidad, utilizada principalmente para transmitir

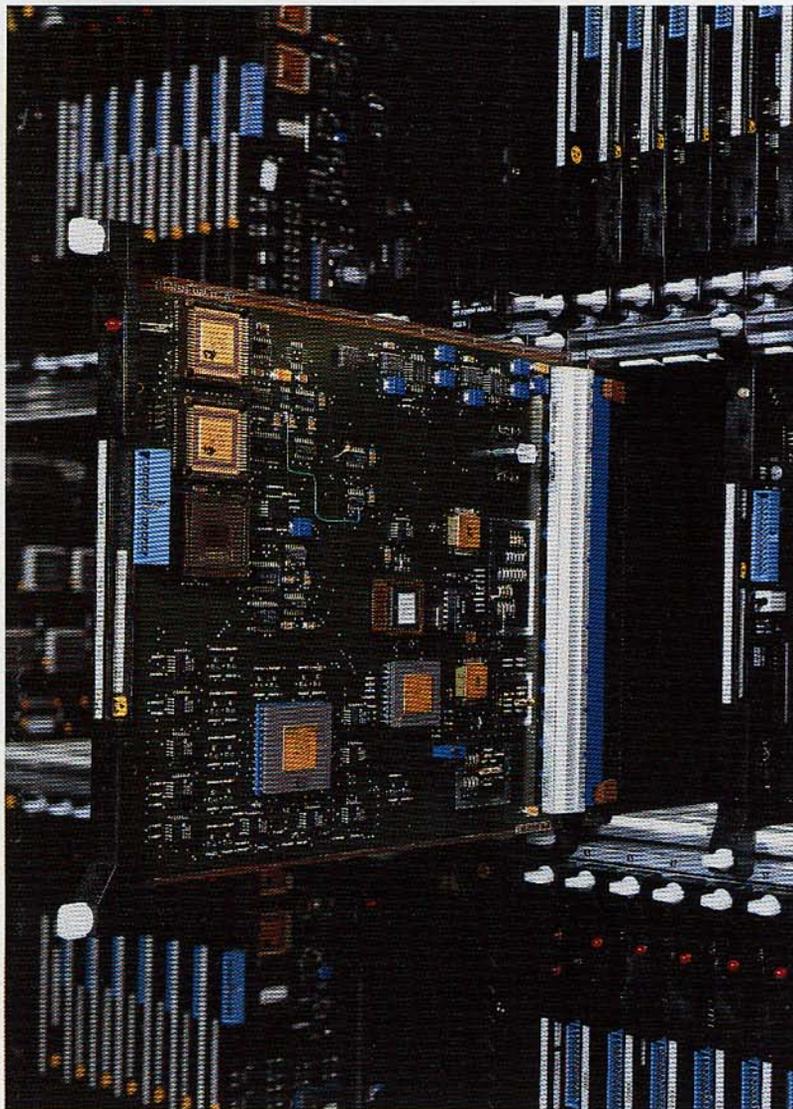
señales de vídeo, permite emplear codecs MIC de vídeo/audio de bajo coste.

Además, se transmiten cuatro canales H_1 , con encaminamiento independiente, cada uno con velocidad binaria bruta 2048 kbit/s y neta 1920 kbit/s. Son aplicaciones probables de estos canales el facsímil de color de alta resolución, la transferencia de documentos y la transferencia de datos. Si para los últimos servicios hubiere de aumentarse la capacidad de transferencia, se podrá dotar al sistema de conmutación multicanal, hasta cuatro canales de 2 Mbit/s.

Los canales de señalización y de datos de la RDSI junto con la información de mantenimiento y sincronización del sistema, se transmiten en un intervalo de tiempo adicional de 2 Mbit/s, reservando otro intervalo de 2 Mbit/s para un acceso a velocidad primaria de RDSI (30B + D_{64}) como soporte a las aplicaciones de PABX; en este

Ampliaciones de la central Sistema 12 para banda ancha en la central BERKOM. Bastidor de la izquierda: matriz de banda ancha y reloj. Bastidor de la derecha: equipo de transmisión para 30 abonados.





Placa muldex con multiplexor de banda estrecha y banda ancha y codec de línea CMI, realizada en práctica de equipo Sistema 12.

caso el intervalo dedicado al acceso básico RDSI permanece libre.

Tras multiplexar los canales, los datos se codifican en CMI (inversión de la marca de código) para obtener un formato de señal adecuado para la transmisión óptica. Estas funciones y las inversas se materializan en una placa multiplexora/demultiplexora que incorpora tres circuitos VLSI de aplicación específica para las siguientes funciones:

- muldex de banda estrecha (IMIC) que proporciona la conversión de trama y la adaptación de las señales de RDSI y de mantenimiento, así como el tratamiento de la sincronización
- muldex de banda ancha (BMIC) para multiplexar y demultiplexar todos los canales de la trama básica
- codec CMI-VLSI para codificación y decodificación de línea de las señales de 153,6 Mbit/s.

Transmisión óptica

La transmisión óptica bidireccional en fibra única se apoya en la multiplexación en longitud de onda (WDM), mediante láseres que trabajan en la ventana de 1300 nm para el BLT (terminal de línea de banda ancha) y en la ventana de 1500 nm para la BNT (terminación de red de banda ancha). Esta configuración aprovecha plenamente la multiplexación de ventanas, llevando al mínimo las restricciones sobre longitud de onda de las fuentes de luz y la dependencia de los acopladores de fibra respecto de la longitud de onda. Además, la interferencia óptica entre los láseres de BLT y de BNT se reduce grandemente por el filtrado que ejercen los acopladores ópticos.

La mayoría de los abonados están situados dentro de un radio de 15 km, por lo que la dispersión de la fibra no crea problemas. Si las líneas de abonado son de mayor longitud (15 a 30 km), como ha ocurrido en Berlín, se necesita utilizar láseres DFB (realimentación distribuida) para los 1550 nm.

Los circuitos electrónicos asociados al emisor y receptor óptico se basan en un diseño a medida que utiliza tecnología bipolar rápida. Consisten en un juego de tres pastillas VLSI:

- amplificador principal
- regenerador, incluyendo oscilador controlado por tensión
- excitador de láser.

Ambos módulos optoelectrónicos (receptor de diodo PIN y módulo láser de 1300 nm) fueron desarrollados y ensamblados en el Centro de Investigación de Alcatel SEL. El módulo transceptor óptico BLT, incluye la parte receptora y transmisora así como el acoplador de fibra óptica.

Terminación de red

El BNT asegura la conversión electroóptica de las señales a la entrada y controla los terminales de banda ancha y estrecha. En el punto de referencia S, se dispone de dos interfaces S_B con posible ampliación a cuatro, para el interfaz con los terminales de banda ancha. El interfaz S_B de cable coaxial a cuatro hilos está especificado según la Recomendación G.703 del CCITT, pero adaptada a una velocidad de 153,6 Mbit/s. La estructura de este interfaz, la misma indicada en la figura 2, permite atender terminales multifunción. Así, durante una llamada por videoteléfono en un canal H_4 , se puede establecer conexión con un banco de datos, por ejemplo, a través de un canal H_1 .

Además de los interfaces de banda ancha, se tiene un bus S_0 estándar que

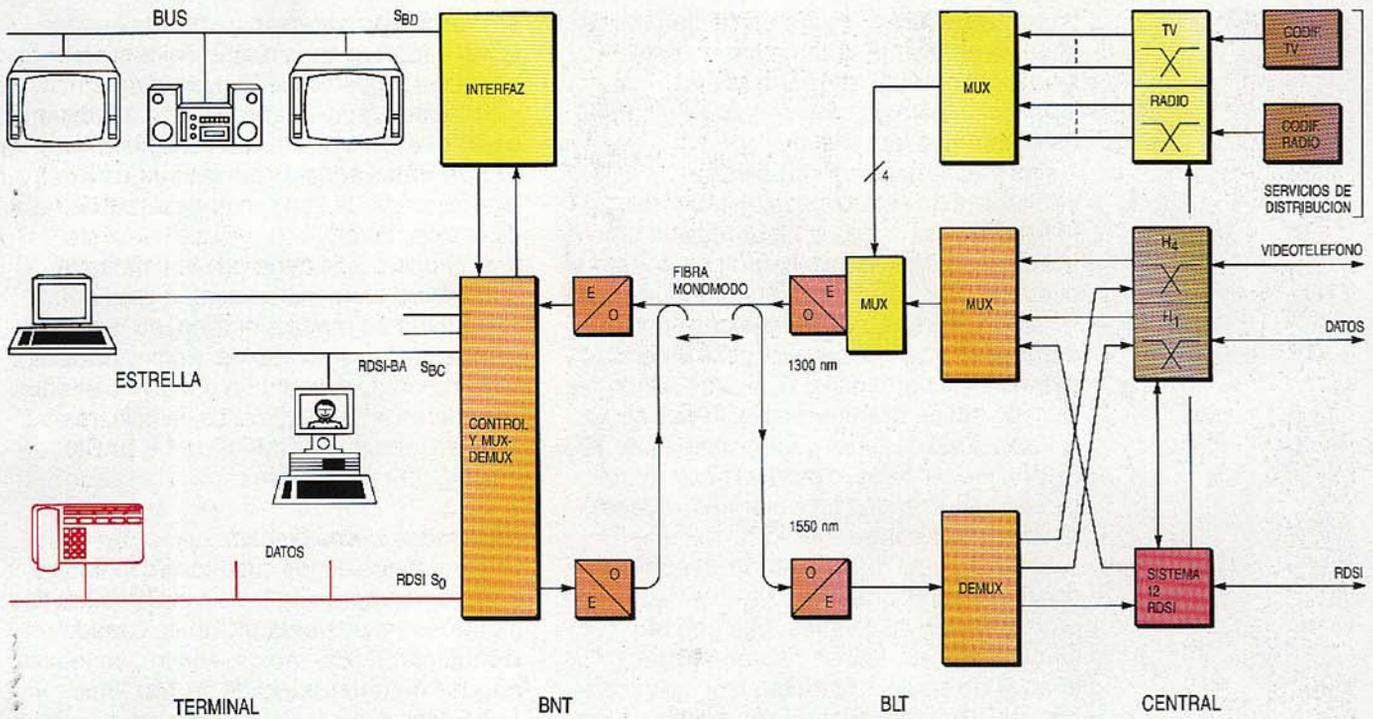


Figura 3
Diagrama de bloques del sistema RDSI-BA/distribución de TV.

permite conectar los terminales RDSI de banda estrecha existentes.

El procedimiento para resolver conflictos entre todos los terminales de banda ancha y banda estrecha responde al principio de eco en el canal D de RDSI, adaptado a la velocidad de 153,6 Mbit/s.

Módulo transceptor óptico para la técnica de transmisión bidireccional con alto margen dinámico (0 a 30 km).

Pruebas de sistema

La instalación de la central en Berlín comenzó en 1987, y los equipos de los

cinco primeros abonados se probaron con éxito en marzo de 1988. Posteriormente, han entrado en servicio las 30 líneas de abonado de esta fase de la red experimental.

Las pruebas de sistema, que cubren todas las funciones esenciales han tenido buen fin, incluyendo:

- conmutación a 2 Mbit/s y 140 Mbit/s
- control de la conmutación de banda ancha por la central Sistema 12
- estabilidad del sistema de distribución de reloj
- sincronización de trama
- multiplexación/demultiplexación de canales
- transmisión óptica bidireccional (≤ 30 km)
- resolución de conflictos a 153,6 Mbit/s
- medida de la tasa de errores de bit extremo a extremo, con una BER muy inferior a 10^{-9} .

Sistema de laboratorio RDSI-BA

Una nueva versión de este sistema está a punto de completarse en el Centro de Investigación de Alcatel SEL; su objetivo es mejorar los componentes clave del sistema utilizando un mayor grado de integración de circuitos VLSI y placas impresas, y además prestar servicios de distribución (Fig. 2). La

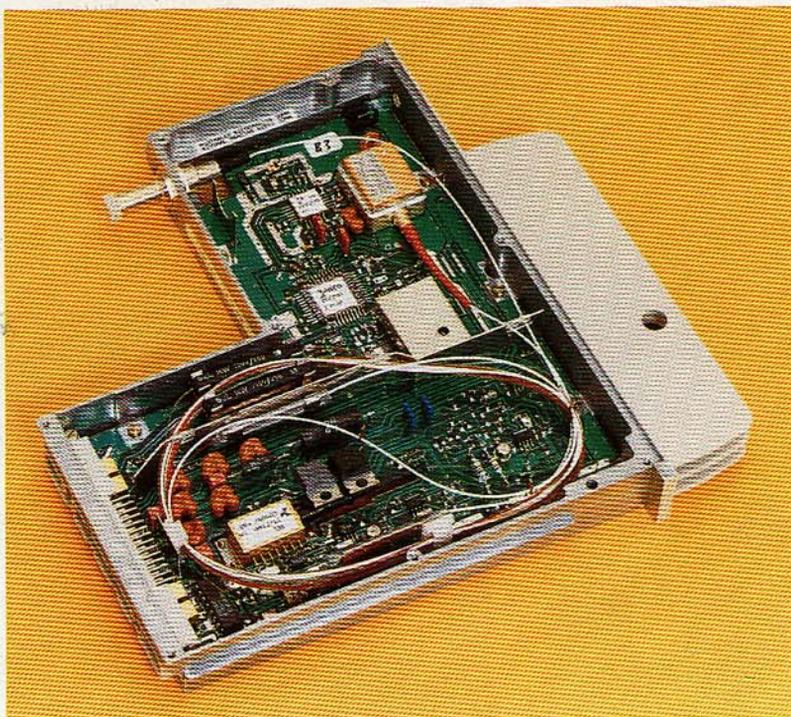


figura 3 muestra el diagrama de bloques del sistema entero: el sistema básico para servicios interactivos (parte inferior) y la ampliación para distribución de TV y sonido estereofónico (parte superior).

Las matrices de conmutación a 140 Mbit/s de servicios de distribución utilizan la misma matriz de puntos de cruce VLSI que la de servicios interactivos. Hasta cuatro señales de TV, cada una por un canal H_4 de 140 Mbit/s, se multiplexan eléctricamente junto con 12 canales de 2 Mbit/s. A petición, el cuarto canal H_4 puede ser conmutado a la central interactiva, lo que ofrece la flexibilidad de tener cuatro canales de TV disponibles a la vez, o bien un canal interactivo de banda ancha (por ejemplo, videoteléfono) y tres canales de TV⁴.

En el sistema de laboratorio, el conmutador de TV está configurado para seleccionar programas de 48 fuentes, que podrían ampliarse hasta 128 en caso necesario añadiendo equipo. El transmisor óptico en dirección hacia el abonado se sustituye por un equipo de 614,4 Mbit/s, que corresponde a una velocidad binaria bruta de cuatro canales de banda ancha básicos. La velocidad de transmisión en sentido contrario es la misma que en el sistema básico.

La terminación de red de banda ancha ofrece, además del interfaz interactivo S_{BC} , un interfaz de bus pasivo para los servicios de distribución con una velocidad de 614,4 Mbit/s hacia los terminales y de 16 kbit/s para señalización de terminales a BNT. La capacidad de transmisión desde la BNT a la central y el equipo utilizado son los mismos que para el sistema interactivo.

Matriz de conmutación de banda ancha
El circuito VLSI de la matriz de conmutación es una matriz de 16 x 16 puntos de cruce sin bloqueo, con 16 entradas de extensión para conectar en cascada varias matrices. Regenera las señales (en fase y en forma) e incorpora circuitos para mediciones de tasa de errores de bit.

El circuito VLSI tiene una velocidad de 280 Mbit/s en modo asíncrono y de 160 Mbit/s en modo síncrono, en las condiciones más desfavorables. En el laboratorio se han podido probar con éxito velocidades superiores a 350 Mbit/s. La pastilla, realizada en tecnología CMOS de 1,5 μm , incorpora 40000 transistores.

Multiplexor/demultiplexor

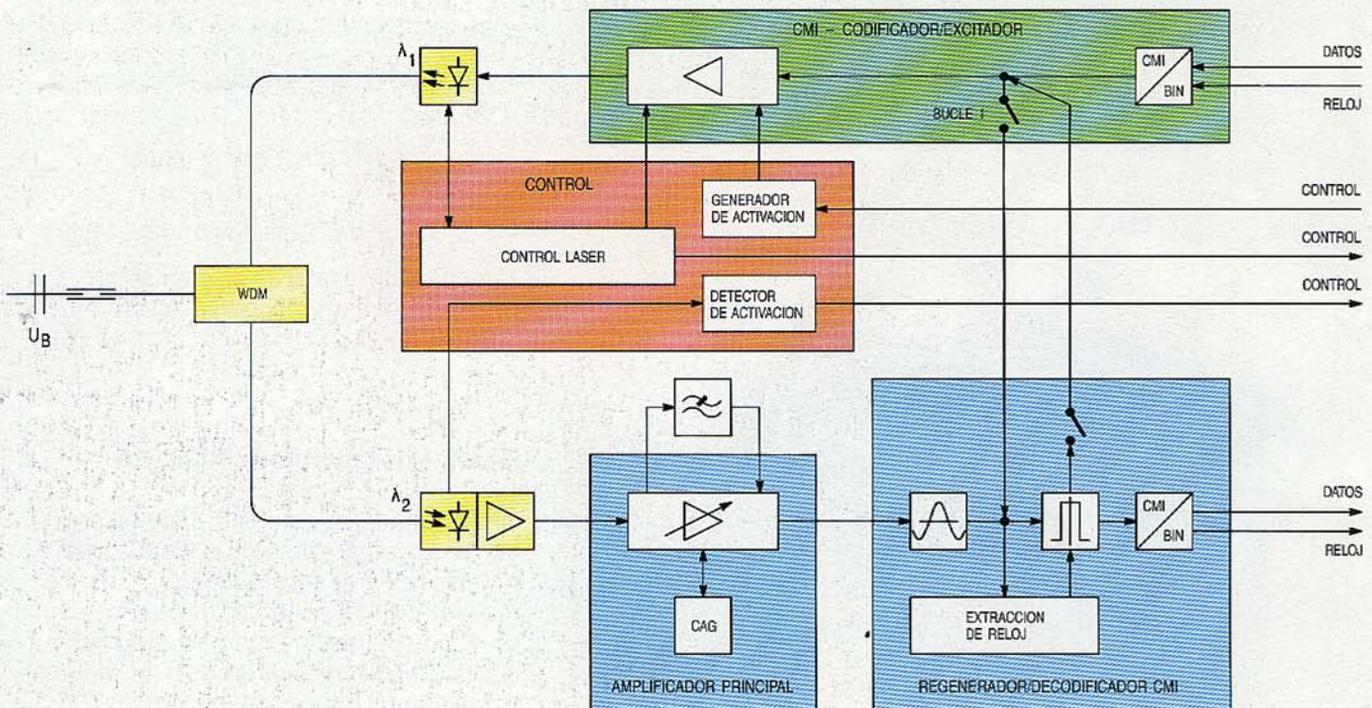
Las funciones de los circuitos VLSI IMIC y BMIC están combinadas en el UBIC (IC de banda ancha universal), circuito basado en tecnología CMOS rápida, con lo que realiza puertos de entrada/salida de 140 Mbit/s y 153,6 Mbit/s, y suministra la memoria y la lógica necesarias para superposición de las cuatro señales de banda ancha en la BNT. La complejidad se aproxima a las 80000 funciones de transistor.

Transceptores ópticos

Los circuitos VLSI para transceptores de 150 Mbit/s y 600 Mbit/s están diseñados para minimizar el tamaño, incrementar el número de funciones de la pastilla y que sea mínimo el número de componentes externos.

Como ejemplo, la figura 4 muestra la partición de la pastilla del transceptor de

Figura 4 Partición de la pastilla para el módulo transceptor óptico de 153,6 Mbit/s, incluyendo funciones de control y codificación de línea.



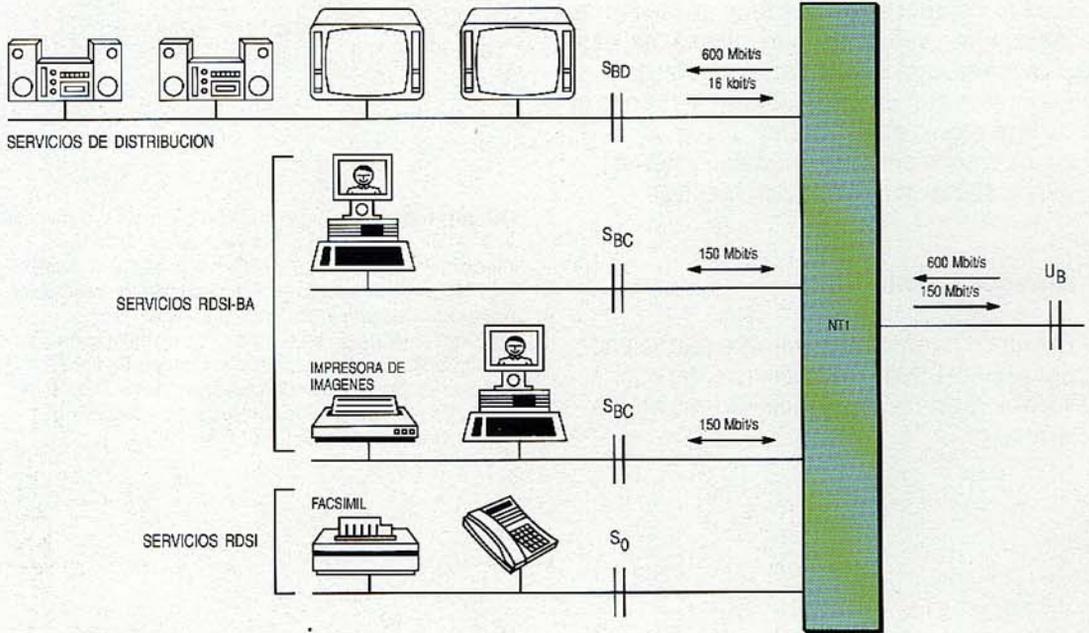
150 Mbit/s, incluyendo los circuitos de activación y los bucles necesarios para el mantenimiento⁵.

El balance de potencia se calcula eligiendo módulos láser de poca potencia, dado su bajo precio y buscando ahorrar la potencia y el espacio que consume el equipo de control de temperatura.

simultáneamente, utilizando uno el canal H_4 y los demás, canales H_1 .

Todos los interfaces BNT de banda ancha en el punto de referencia S son ópticos y están diseñados para conexión de fibras ópticas multimodo de índice gradual. Se prefiere esta solución a la de fibra óptica monomodo, pues se estima que los costes

Figura 5
Configuración de acceso de la red interna de abonado a RDSI-BA/distribución de TV.



El transceptor óptico para señales de 614,4 Mbit/s consiste en un conjunto de tres pastillas VLSI. Existen dos versiones: una para líneas de abonado de hasta 6 km, y otra para las que van hasta 20 km. Las respectivas entradas ópticas difieren en sensibilidad, y en ambos casos los módulos láser están controlados en temperatura.

Terminación de red de banda ancha

Como se aprecia en la figura 5, hay tres tipos de interfaz que respectivamente corresponden a terminales RDSI de banda estrecha (bus S_0), terminales de comunicación de banda ancha (S_{BC}) con una capacidad bidireccional de 153,6 Mbit/s, y terminales de distribución de banda ancha (S_{BD}) con 614,4 Mbit/s hacia el terminal y 16 kbit/s desde el terminal. El último de ellos tiene una configuración de bus pasivo capaz de hasta 10 tomas para conexión a terminales. La señalización para establecimiento, liberación y selección de programas utiliza un protocolo de canal D con modificaciones en la capa 3.

El interfaz de comunicación de banda ancha (S_{BC}) es del tipo estrella física/bus lógico con posibilidad de cuatro accesos, lo que permite atender a diferentes terminales

de instalación doméstica de estos últimos sistemas son sustancialmente mayores. Además, pueden utilizarse fuentes de luz de bajo costo: LED para la señalización a 16 kbit/s en los servicios de distribución y diodos láser de 800 nm para las señales de 153,6 Mbit/s y 614,4 Mbit/s. En esta longitud de onda, son muy comunes los láseres de bajo costo para lectores de disco compacto, y es posible utilizar económicos diodos receptores PIN de silicio.

Instalaciones del sistema

La realización de los componentes del sistema está prevista para principios del año 1989, y el final de las pruebas de integración, en Alcatel SEL para mediados del año. Se proyecta una demostración de RDSI-BA/distribución de TV en diciembre de 1989 en Berlín, y está prevista la entrega de un segundo sistema al PTT de Suiza para las pruebas piloto de banda ancha en Basilea a mitad de 1990.

Conclusiones

El sistema RDSI-BA realizado por Alcatel-SEL amplía los principios de la RDSI para

sustentar servicios de banda ancha en las gamas de 2 Mbit/s y 140 Mbit/s. El satisfactorio funcionamiento del sistema en la red experimental BERKOM permite actualmente estudiar los servicios de banda ancha y los sistemas de usuario final para una gran variedad de aplicaciones. El concepto es altamente modular y puede extenderse a la distribución de sonido estéreo y de televisión, ofreciendo así a los abonados un acceso universal. Todos los componentes del sistema están basados en las tecnologías más avanzadas, con miras a realizar un sistema que pueda ser ofrecido a los abonados a un precio de dos o tres veces el de la telefonía actual, siempre que se alcance suficiente mercado del sistema para justificar su producción masiva.

Agradecimiento

El trabajo ha sido parcialmente patrocinado por el BMFT (Ministerio de Investigación y Tecnología de la República Federal de Alemania).

Referencias

- 1 Red digital de servicios integrados (RDSI): *Libro Rojo del CCITT*, fascículo III.5, Recomendaciones de la Serie I, publicado por la UIT, 1985, Ginebra.
- 2 B. Butscher y otros: BERKOM — A B-ISDN Pilot Project: *Proceedings E-ISDN 88*, Amsterdam.
- 3 D. Böttle, T. Dripke y G. Eilenberger: Realización de una central de banda ancha: *Comunicaciones Eléctricas*, 1987, volumen 61, n° 4, págs. 428-432.
- 4 G. Domann: A B-ISDN System Concept and the BERKOM-Testnetwork: *EUROINFO '88 — First European Conference on Information Technology for Organisational Systems*, mayo 1988, Atenas.
- 5 G. Domann: B-ISDN: *IEEE Journal of Lightwave Technology*, noviembre 1988, volumen 6, n° 11, pág. 1720.

Günter H. Domann nació en 1950. Se graduó Dipl-Phys y Dr rer nat en la Universidad Técnica de Karlsruhe, Alemania Occidental, en 1974 y 1978, respectivamente. En 1979 trabajó en las investigaciones de alta resolución óptica en la Universidad de Yale. En 1981, el Dr. Domann ingresó en el Centro de Investigación de Alcatel SEL, siendo sus primeros trabajos en fibras ópticas, sensores y comunicaciones ópticas. Actualmente es responsable del proyecto para el desarrollo del sistema prototipo de RDSI-BA.

Comunicación de datos en una red ATM

Una futura red de banda ancha basada en el modo de transferencia asíncrono (ATM) cursará un tráfico de datos elevado. Por consiguiente el diseño de tal red ha de tener en cuenta las especiales características y requisitos de la comunicación de datos, sobre todo en cuanto al retardo de establecimiento de la llamada.

M. De Prycker

Alcatel Bell Telephone, Amberes, Bélgica

Introducción

Aunque las RDSI acaban de entrar en explotación comercial, ya la RDSI de banda ancha (RDSI-BA) les plantea un serio desafío como sucesora. Ello se debe a que la RDSI de banda estrecha tiene una serie de limitaciones, entre ellas la anchura de banda, que la restringe a una baja velocidad de transmisión de datos y una escasa calidad de señales de vídeo.

Numerosos abonados precisan ya una RDSI-BA para atender exigencias en aumento^{1,2,3}. En el caso de los abonados de empresa, el uso generalizado de RAL (redes de área local) que trabajan de 1 a 10 Mbit/s está propiciando una demanda de transferencia de datos a alta velocidad a través de la red pública, la cual se intensificará con la aparición de ordenadores personales y estaciones de trabajo más potentes, y de aplicaciones de alto rendimiento, tales como servidores de ficheros y de impresora, proceso y bases de datos distribuidos.

Por otra parte, es verosímil que los abonados residenciales utilicen al máximo servicios de vídeo como la TV distribuida y por cable, videotecas que ofrecen películas, videotelefonía, y vídeos educativos. La calidad de imagen requerida para estos servicios varía desde un nivel medio (comparable al de magnetoscopios, 2 a 5 Mbit/s), a otro mejor (20 a 30 Mbit/s), y al de TV de alta definición (140 Mbit/s).

Al mismo tiempo, los progresos tecnológicos abren nuevos horizontes, y ejemplos de ello son los avances en transmisión óptica (fibras, láseres y sus excitadores, diodos LED, PIN, fotodiodos de avalancha) que ofrecen velocidades superiores y costes más bajos^{4,5}, los circuitos integrados de alta complejidad y velocidad en tecnologías CMOS y BICMOS⁶, y los nuevos conceptos de conmutación^{7,8,9,10}. Los Centros de Investigación de Alcatel hacen progresar el estado de la técnica en todas estas áreas.

La industria de telecomunicación, las administraciones y las organizaciones de normalización (CEPT, T1, CCITT) examinan desde hace muchos años las funciones de una nueva red de banda ancha, con especial atención a las ventajas y desventajas del modo de transferencia síncrono (STM) clásico —basado en una red de conmutación de circuitos— y del modo de transferencia asíncrono (ATM), más moderno, que se apoya en la conmutación de paquetes. Tras largos debates el CCITT decidió que debería utilizarse el ATM en la futura red de banda ancha, y así lo señala el Proyecto de Recomendación I.121 que define básicamente el ATM, si bien quedan por decidir muchos parámetros esenciales durante el próximo periodo de estudios. Sin embargo, esta definición atañe a los servicios que ha de cursar una RDSI-BA, sobre todo los servicios de datos, que constituirán una parte importante del futuro tráfico en banda ancha.

Alcatel Bell ha estudiado ya los valores óptimos de los mencionados parámetros¹¹, y prosigue sus trabajos en tal sentido. La dedicación de Alcatel al ATM queda patente por su participación en un proyecto experimental de Bélgica, así como en los que están programados para Francia, Italia, Noruega, Alemania y España. Además, Alcatel Bell es el contratista principal para el más importante proyecto RACE en tecnología ATM.

Requisitos de los servicios de datos

Las actuales redes de datos especializadas han de cumplir una serie de requisitos, siendo los más estrictos los que afectan a la tasa de error, al retardo de establecimiento de llamada* y al modo sin conexión, que

* El tiempo que transcurre en el extremo de origen entre el envío de una orden de solicitud de llamada y la recepción de una orden de llamada conectada, sin tener en cuenta el retardo de transmisión.

difieren considerablemente de los impuestos a otros servicios, tales como la voz y el vídeo.

Retardo de establecimiento de llamada/operación sin conexión

El retardo de establecimiento de llamada en las actuales redes públicas X.25 de comunicación de datos, según define el CCITT (X.135, X.92), está en torno de los 100 ms para una red nacional típica. Sin embargo, algunos abonados solicitan ya retardos de decenas de milisegundos. Las redes locales de datos, en especial las RAL, tienen un retardo de establecimiento de llamada nulo, ya que operan en modo "sin conexión".

La exigencia de un tiempo de establecimiento de llamada nulo o despreciable es característica de las aplicaciones de datos, e imprescindible para un control totalmente distribuido, donde los procesadores han de intercambiarse datos con retardo sumamente pequeño.

Hoy día muchas redes privadas de datos, en especial las RAL, ofrecen un servicio sin conexión (en la parte superior de la capa 3 ISA) como se ve en la figura 1, el cual se caracteriza principalmente por:

- Inclusión de la dirección completa en cada paquete. La mayoría de las RAL son "redes de difusión" a nivel de MAC (control de acceso al medio), es decir, cada nodo conectado a la RAL puede "oír" lo que hay en la línea. Así, para señalar el destinatario, cada paquete llevará su dirección de destino entera. Es lógico, pues, que en un entorno RAL no deba establecerse ninguna conexión más en una capa ISA superior (control lógico del enlace o Internet), y que las RAL operen en un modo sin conexión.
- Innecesidad de control de conexión: en el modo sin conexión no se utiliza ningún procedimiento adicional de establecimiento y liberación. En un entorno RAL, la capa de control de acceso al medio es ya por sí misma sin conexión; el control lógico del enlace (LLC2) sólo añade unas pocas funciones (identificación de centrales, prueba). El protocolo Internet para interconectar RAL, si lo hubiere, también podrá operar en modo sin conexión. Un modo orientado a la conexión, que suele convenir en cuanto a sobrecarga de proceso (menos bits de dirección) y encaminamiento (la ruta sólo se determina una vez en cada nodo involucrado), no ofrece ventajas en una RAL puesto que el control de llamadas aumenta la complejidad.
- La llegada de paquetes en una cierta secuencia no está garantizada, sobre

todo en redes con varias RAL, donde hay multiplicidad de trayectos a través de los distintos accesos.

La ausencia de control de conexión, con la complejidad que entraña, y un retardo de establecimiento de llamada despreciable son ventajas reales que por tanto se recomiendan para futuras redes de datos, como la ATM.

Comportamiento ante los errores

En una red ATM, pueden producirse errores por tres motivos: alteración de bits causada

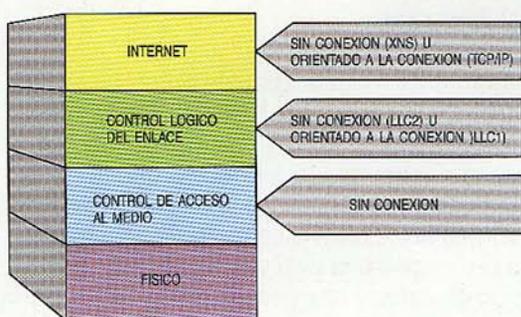


Figura 1
Almacenamiento en las capas ISA 1-3 utilizado por el IEEE 802 para las RAL.

por imperfecciones en el equipo de transmisión y conmutación, pérdida de células (es decir, paquetes ATM) debida al desbordamiento de colas, e inserción de células que resulten de alteración de bits en el encabezamiento. La tasa total de error de extremo a extremo debe mantenerse dentro de ciertos límites dependientes de la aplicación. La baja tasa de error necesaria vendrá en parte garantizada por la red (la calidad de los enlaces, por el buen diseño, y la calidad de los nodos y la baja probabilidad de pérdida de células, por el correcto dimensionado de los recursos) y en parte, si es preciso, por la capa de transporte entre puntos extremos.

El control de errores, sobre todo para la carga en las colas, tiene especial importancia en una red ATM, y está afectado por la asignación de recursos y el control de la congestión. Es por ello que la red ATM debe estar orientada a la conexión, pues gracias a su alta calidad puede prescindir de controlar errores en cada trayecto. Por supuesto, las redes orientadas a conexión pueden controlar la carga de las colas y los errores que resultan de la pérdida de células. Si la red ATM tuviera que operar en un modo sin conexión, no podría controlarse la carga y la calidad en cuanto a errores sería muy escasa, siendo imposible controlar errores solamente de extremo a extremo como establece la definición de ATM.

Modo sin conexión u orientado a la conexión

Ya que el ATM, por definición, está orientado a la conexión, se deben tomar medidas que aseguren una calidad de servicio igual a la del modo sin conexión, sobre todo en el tiempo de establecimiento de llamada. La emulación del modo sin conexión y la asignación permanente o semipermanente de canales virtuales son alternativas que ofrecen la misma calidad de servicio en cuanto a dicho tiempo de establecimiento.

Emulación del modo sin conexión

En las redes públicas, el tiempo de espera durante la fase de conexión es la suma del tiempo de establecimiento de la llamada y el retardo de transmisión – en una gran red nacional habrá trayectos de hasta 5000 km, con 25 ms de retardo –. Sin embargo, en el modo sin conexión el tiempo de espera iguala al retardo de transmisión, más un tiempo de conmutación despreciable en los nodos

Si el tiempo de establecimiento de llamada es menor o igual que el retardo de transmisión, el tiempo total de espera a lo sumo duplicará el valor de dicho retardo. Esto significa que el tiempo de espera total máximo en ATM es el doble que en un sistema que trabaje en modo sin conexión. Con miras a un "tiempo de establecimiento de llamada nulo", este sistema orientado a la conexión tiene una calidad de servicio comparable a la de un sistema sin conexión.

Con un tiempo típico de transmisión de 25 ms (transmisión a 5000 km), si las futuras redes ATM establecen una llamada en menos de 25 ms, puede garantizarse una calidad de servicio comparable a la del modo sin conexión. Como las redes normalmente tienen más de un nodo (suelen ser cuatro o cinco para redes nacionales), estos 25 ms admiten diversos repartos:

- Distribución equitativa entre todos los nodos de la red, de la que resultaría un retardo de unos 5 ms por nodo.
- Si las funciones de establecimiento de llamada sólo han de ejecutarse en los "nodos limítrofes" de la red y los intermedios operan en modo "sin conexión" (Fig. 2), entonces sólo dos nodos ejecutan el establecimiento de la conexión, con un retardo de 12,5 ms cada uno. Se han propuesto varios métodos para trabajar dentro de la red en modo sin conexión: la solución de ruta virtual directa^{12,13} proporciona caminos permanentes o semipermanentes entre nodos de la red, compartidos por todos los usuarios¹⁴. Un concepto comparable es el de los "gru-

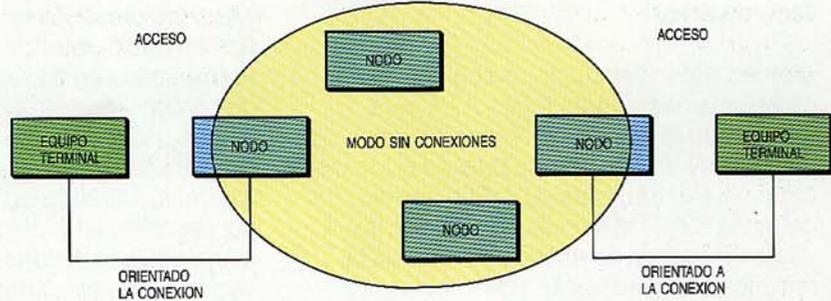


Figura 2
Modos sin conexión y orientado a la conexión.

pos de servicios"¹⁵, mientras que otra solución consiste en el autoencaminamiento entre nodos¹⁶.

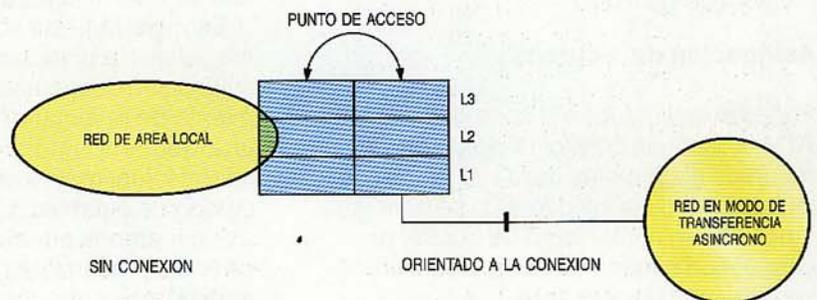
Para que pueda admitirse una RAL como punto terminal (Fig. 3), el acceso de la RAL a la red ATM debe ser capaz de almacenar el tren de datos total durante el establecimiento de la llamada. Así, si esta función dura 25 ms y la velocidad es de 50 Mbit/s, dicho punto de acceso debe ofrecer una memoria tampón de 1,25 Mbit. En el caso más desfavorable (una RAL de 100 Mbit/s en la que todas las peticiones de llamada llegan al mismo tiempo, dicha memoria necesita 2,5 Mbit.

Si el punto extremo es un ordenador o un terminal de datos de alta velocidad, el tiempo de espera durante el procedimiento de conexión puede aprovecharse para otras tareas, siempre que el sistema operativo aporte la programación adecuada.

Identificación del canal virtual permanente

Si los puntos extremos que requieren una emulación del modo sin conexión se conectan a través de la red mediante ICV (identificación del canal virtual) permanentes, puede garantizarse un tiempo "casi nulo" de establecimiento de llamada. Con este enfoque, se asignan varios ICV de modo permanente o semipermanente, habiendo menos ICV disponibles que en el caso de su compartición dinámica. Sin embargo, no habría tal problema si se tuvieran 65.000 ICV (se espera que para identificación se utilicen al menos 16 bits).

Figura 3
Punto de acceso entre una RAL y una red ATM.



Tasa de error

Merced a los avances tecnológicos, la tasa de error de las futuras redes ATM será menor que la de las actuales redes de datos, previendo una tasa total de error extremo a extremo de 10^{-8} . Ello permite definir la red ATM sin aplicar en cada trayecto un control de errores basado en la retransmisión automática de información cuando se detecta un error, como sucede en las actuales redes públicas de datos X.25. Los eventuales errores, se subsanarán sólo por procedimientos de extremo a extremo, es decir, en la capa ISA de transporte.

Se ha demostrado¹⁷ que si la tasa de errores de bit es inferior a 10^{-5} , el tráfico no debe sufrir un incremento apreciable por efecto de la retransmisión al utilizar el procedimiento de corrección extremo a extremo, y no por trayectos sucesivos. Dicha corrección se localizará entonces en la capa de transporte, cuya clase dependerá de la aplicación. Por ejemplo, la transferencia electrónica de fondos puede exigir la clase 4 (máxima corrección de errores), pero con la tasa total de extremo a extremo de 10^{-8} prevista, bastará la clase 0 (ningún control de error) para la mayoría de aplicaciones.

Además, el tipo de solicitud automática de repetición a utilizar requiere un análisis más profundo. En efecto, a velocidades elevadas (cientos de Mbit/s) y grandes tiempos de propagación ida-retorno, que requieren mayores memorias "ventana", la velocidad efectiva de transmisión puede reducirse drásticamente si se utiliza un "Go-Back-N" puro (retransmisión de todas las tramas no confirmadas, aunque hayan llegado correctamente)¹⁸. Para el ATM cabe considerar dos soluciones:

- Principio del rechazo selectivo para evitar la retransmisión innecesaria de las células correctamente recibidas.
- Códigos de corrección de errores sin canal de retorno, evitando toda retransmisión. Dado que los errores suelen producirse en ráfagas, esta técnica requerirá una excesiva sobrecarga de proceso.

Asignación de recursos

Por estar orientadas a la conexión, las redes ATM facilitan un control eficiente de los recursos disponibles de la red sin degradación alguna de la calidad. Ello se consigue mediante un mecanismo de control de congestión basado tanto en medidas preventivas como correctivas.

Medidas preventivas: si cada fuente puede fijar en detalle sus características de tráfico (expresadas en parámetros de distribución de probabilidad), lo que a veces es difícil en las RAL, la red tendrá en cuenta estos valores para decidir la aceptación de la llamada. Además, situando en puntos críticos (interfaz usuario-red y tal vez en enlaces internacionales) las funciones de vigilancia y observación – que aseguran que cada fuente respeta su distribución de tasa de bits declarada –, se aprovechan al máximo los recursos de red.

Medidas correctivas: cuando se presenta congestión en ciertos nodos, pueden desecharse células. El número de éstas será limitado si se adoptan las medidas preventivas adecuadas, además de otras previsiones a largo plazo como el reencaminamiento o abandono de una llamada.

Se han propuesto ya buenos algoritmos de asignación de recursos para una combinación de fuentes con diversas funciones de densidad de probabilidad (poissoniana, gaussiana, geométrica, etc.), todas sin ningún carácter impulsivo específico¹⁹. Se prosiguen las investigaciones en este campo, y se espera lograr una asignación de recursos casi óptima para funciones de densidad de probabilidad no impulsivas.

Las redes en el modo sin conexión no tienen una asignación de recursos inherente (carecen de control de conexión), por lo que pueden o bien utilizar con menor eficacia los recursos disponibles, o bien utilizarlos de modo quasi-óptimo con degradación de la calidad. La alternativa es tener que añadir mecanismos más complejos de control de la congestión (control de flujo).

Las aplicaciones de datos son típicamente impulsivas. Si la emulación del modo sin conexión se ve apoyada por una rápida fase de establecimiento de la conexión, será posible asignar los recursos necesarios a las ráfagas individuales. En este caso, cada ráfaga pertenece a la categoría de funciones de densidad de probabilidad en las que dan excelentes resultados los algoritmos de asignación de recursos. La asignación por ráfaga es posible por ser despreciable el tiempo de establecimiento de llamada (realmente, el tiempo de establecimiento más el tiempo de transmisión).

Escogiendo esta solución, cada nodo en el que vaya a ejecutarse el algoritmo de asignación de recursos (o sea, el establecimiento de la llamada) debe equiparse con una memoria tampón para almacenar la información impulsiva que llega durante el tiempo de establecimiento. El tamaño de dicha memoria puede mantenerse dentro de límites razonables si no llegan a la vez demasiadas solicitudes de llamada.

Conclusiones

La aparición de una red de banda ancha basada en el ATM descubre nuevos horizontes para numerosas aplicaciones de telecomunicación. Sin embargo, una red ATM debe también cursar los servicios de datos existentes al menos con la misma calidad actual.

El requisito más exigente en un servicio de datos es un bajo retardo de establecimiento de llamada; en el modo sin conexión se requiere que este retardo sea nulo. Para lograrlo existen diversas técnicas, entre ellas la emulación sin conexión y los ICV permanentes. En consecuencia, la red ATM deberá ser capaz de prestar la mayoría de los servicios de datos sin ningún cambio apreciable de parámetros salvo en el retardo de establecimiento de la llamada.

Reconocimiento

Parte de este trabajo ha sido subvencionado por la Administración de Telecomunicaciones (RTT) de Bélgica.

Referencias

- 1 D. Spears: Broadband ISDN: Service Visions and Technological Realities: *International Journal of Digital and Analog Cabled Systems*, volumen 1, n° 1, págs. 3-18.
- 2 H. Armbruster: Applications of Future Broadband Services in the Office and Home: *IEEE Journal on Selected Areas in Communication*, julio 1986, volumen 4, n° 4, págs. 429-437.
- 3 M. Kurachi: Present Trends in High Speed and Broadband Communications Services in Japan: *IEEE Journal on Selected Areas in Communication*, julio 1986, volumen 4, n° 4, págs. 438-443.
- 4 L. Cohen: Trends in US Broadband Fiber Optic Transmission Systems: *IEEE Journal on Selected Areas in Communication*, julio 1986, volumen 4, n° 4, págs. 488-497.
- 5 G. Khoe and H. Lydtin: European Optical Fibres and Passive Components: Status and Trends: *IEEE Journal on Selected Areas in Communication*, julio 1986, volumen 4, n° 4, págs. 457-471.
- 6 H. Yamada, H. Kataoka, T. Sampei y T. Yano: High-Speed Digital Switching Technology Using Space Division Switch LSIs: *IEEE Journal on Selected Areas in Communication*, julio 1986, volumen 4, n° 4, págs. 529-535.
- 7 J. Bauwens y M. De Prycker: Experiencias en banda ancha mediante técnicas de división de tiempo asincrónicas: *Comunicaciones Eléctricas*, 1987, volumen 61, n° 1, págs. 123-130.
- 8 W. De Kinder y M. De Prycker: ATM: A Logical Evolution from ISDN: *Eurinfo '88*, mayo 1988, Atenas.
- 9 J. Coudreuse y M. Serval: Prelude: an ATD Switched Network: *International Conference on Communication*, 1987, Seattle, documento 22.2.
- 10 J. Turner y L. Wyatt: A Packet Network Architecture for Integrated Services: *Globecom 1983*, 1983, San Diego, págs. 45-50.
- 11 M. De Prycker: Definition of Network Options for the Belgian ATM Broadband Experiment: *IEEE Journal on Selected Areas of Communication*, diciembre 1988.
- 12 S. Sutherland, J. Burgin y R. Addle: Virtual Direct Routing Techniques: *Workshop on ATM*, junio 1988, Ginebra.
- 13 J. Burgin, R. Addle y S. Sutherland: Information Transfer Protocols for the Broadband ISDN: *Workshop on ATM*, junio 1988, Ginebra.
- 14 H. Ohnishi y T. Okada: A User-Network Interface Protocol for Connectionless Communications on ATM Network: *Workshop on ATM*, junio 1988, Ginebra.
- 15 L. Wu, E. Arthurs y W. Sincoskie: A Packet Network for BISDN Applications: *IZS*, marzo 1988, Zurich, págs. 191-197.
- 16 P. Kirton, J. Ellershaw y M. Littlewood: Fast Packet Switching for Integrated Network Evolution: *Proceedings of the International Switching Symposium 87*, Phoenix, Arizona, marzo 1987, págs. 455-461.
- 17 Load Increase Under Link-By-Link and End-to-End Error Recovery: *CCITT Study Group XVIII*, febrero 1987, contribución 987 (EE.UU.), Brasilia.
- 18 S. Johnson: Quality of Service Requirements and Protocols for Data Services: *Workshop on ATM*, junio 1988, Ginebra.
- 19 W. Verbiest, L. Pinnoo y B. Voeten: Statistical Multiplexing of Variable Bit Rate Video Sources in ATM Networks: *Globecom 1988*, diciembre 1988, Hollywood.

Martin De Prycker nació en Sint-Niklaas, Bélgica, en 1955. En 1978 se graduó en informática en la RijksUniversiteit de Gante, doctorándose en ingeniería eléctrica y en informática en 1979 y 1982, respectivamente. Desde entonces ha trabajado en el departamento de sistemas avanzados de conmutación del Centro de Investigación Avanzada de Alcatel Bell. Actualmente dirige el proyecto para la Asociación Belga de Banda Ancha. El Dr. De Prycker es desde 1985 profesor a tiempo parcial en la Universidad Boston de Bruselas.

Nuevo protocolo para transmisión de datos en células ATM

Los protocolos de transmisión concebidos para los actuales sistemas de transmisión de datos no ofrecen rendimiento óptimo cuando se emplean técnicas ATM. Se propone un nuevo protocolo diseñado para funcionamiento óptimo en red ATM, que sólo impone una pequeña sobrecarga a la célula ATM.

J. Coupaye
G. Gastaud
 Alcatel CIT, Vélizy, Francia
G. Le Bihan
 Alcatel CIT, Lannion, Francia

Introducción

Las velocidades (hasta 600 Mbit/s) de los enlaces físicos que dan acceso a una RDSI-BA (red digital de servicios integrados de banda ancha) basada en el ATM (modo de transferencia asíncrono) y las velocidades de los enlaces internos de dicha red hacen posible definir servicios de transferencia de datos a gran velocidad. Tales servicios portadores ofrecerán a los abonados una protección contra los errores igual o mejor que la alcanzada en las transmisiones de datos actuales. Además, los nodos de una red ATM pueden aprovechar para sí mismos servicios semejantes (comunicación interna dentro de nodos y comunicación entre nodos). Considerando el gran número de RAL (redes de área local) existentes,

una velocidad útil en torno a 10 Mbit/s parece un objetivo razonable para aplicaciones comerciales.

Cabe preguntarse si a tales velocidades convienen todavía las técnicas actuales como el HDLC (control de alto nivel del enlace de datos), y si no sería ventajoso tener en cuenta las características específicas de la técnica de transferencia ATM.

Características ATM

El elemento básico de la transferencia ATM es una *célula* de longitud fija aunque corta (36 octetos es el valor adoptado provisionalmente en Europa). Cada célula consta de un encabezamiento de longitud fija (4 octetos) y un cuerpo útil también de longitud

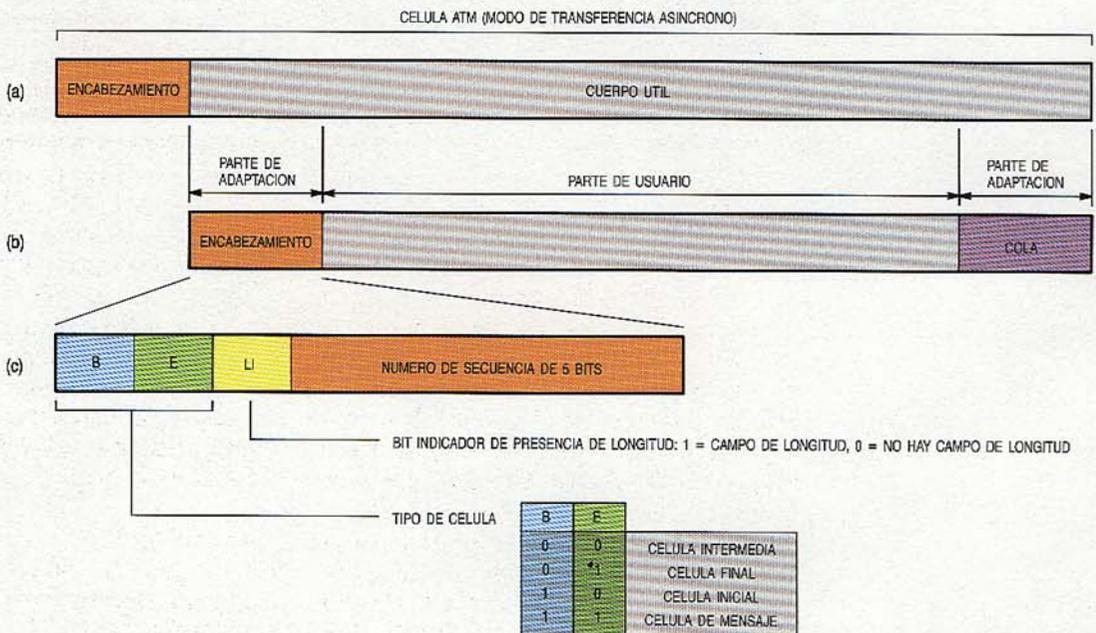


Figura 1
 Estructura de una célula ATM:
 (a) célula,
 (b) cuerpo útil,
 (c) encabezamiento.

determinada (32 octetos), como se indica en la figura 1a. El encabezamiento contiene una *etiqueta* que identifica la comunicación virtual a la que pertenece la célula, y que está protegida por un código de detección de errores y recuperación. El cuerpo útil es el vehículo que transporta de un modo transparente cualquier información dependiente del servicio.

Las células correspondientes a todas las comunicaciones que origina un usuario dado se multiplexan sobre el enlace de acceso físico de dicho usuario. En un nodo ATM, las células se conmutan por etiquetas; existe una correspondencia temporal entre la etiqueta del circuito virtual de una comunicación que llega por un enlace entrante y la del circuito virtual de esa misma comunicación por un enlace saliente.

La flexibilidad del ATM reside en su capacidad de utilizar la misma técnica para nodos y vías de transmisión, sean cuales fueren el servicio y la velocidad, lo cual permite una integración de servicios real. El empleo del ATM en RDSI-BA ofrecerá muchas ventajas a usuarios y administraciones.

No obstante, las redes ATM no son perfectas. Siempre habrá errores en los enlaces y dentro de los nodos. La ausencia de control de flujo hace a la red ATM más propensa a la congestión — y por tanto a la pérdida de células — cuando se emplea multiplexación estadística. Además, estas redes pueden distorsionar la escala temporal de la información transmitida, con el riesgo de destruir o alterar el valor y el significado de la información de usuario ligada a la relación temporal entre elementos de esta información. Se considera factible y económicamente atractivo que sea el usuario quien incorpore, en los casos y momentos en que sea necesario, funciones de *adaptación o convergencia* para corregir tales errores de la red ATM.

¿Son adecuadas las soluciones clásicas?

Para los servicios de transferencia de datos son esenciales ciertas funciones de la capa 2 ISA (Recomendación X.212 del CCITT): la protección contra errores de transmisión o errores advertidos como tales, y la delimitación de la información de usuario durante la transmisión. En las redes de datos actuales, incluidas las RDSI de banda estrecha, se han utilizado técnicas del tipo HDLC, ideadas ante todo para velocidades de datos bajas a medias y para funcionar por vías de transmisión no exentas de errores.

La protección contra errores de transmisión se efectúa en dos niveles: nivel de

transmisión (parte inferior de la capa de enlace de datos, denominada 2.1) y nivel de procedimiento (parte alta de la misma capa, llamada 2.2). El presente análisis se ciñe al nivel de transmisión.

Delimitación por HDLC

En la técnica HDLC, la delimitación de tramas se realiza utilizando banderas al principio y al final de la información, además de bits de justificación. La longitud de la trama depende, pues, de la propia información de usuario. La justificación es necesaria para alcanzar transparencia en la información de usuario cuando se emplean banderas para delimitar. En el lado receptor se desechan las tramas que infringen las reglas de delimitación.

El formato fijo de la célula ATM y la multiplexación ATM sincronizada permiten encapsular cualquier información, sea cual fuere su longitud, en un número finito de células de longitud fija, con independencia de la información de usuario que contengan.

Detección de errores en HDLC

La protección de la información en HDLC se basa en una VRC (verificación de redundancia cíclica) de dos octetos (cuatro en el caso de las RAL) añadida en cada unidad de datos de usuario, justo delante de la bandera de fin. Este código de protección permite detectar todos los errores simples y dobles, así como las ráfagas (errores de bit consecutivos) de 16 bits o menos; es muy conveniente para enlaces de transmisión con errores aleatorios y en ráfaga. Ráfagas de errores más largas pueden no ser detectadas: la probabilidad de no detectar una ráfaga de 17 bits es de 1 en 32 768, mientras que para una ráfaga mayor de 17 bits es de 1 en 65 536.

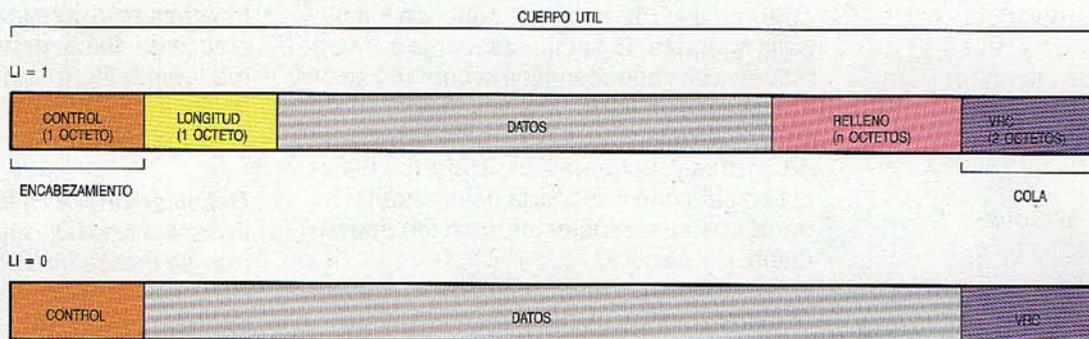
Es muy probable que las redes ATM utilicen transmisión por fibra óptica, pues han de prestar servicios de vídeo. Este medio presenta menos ráfagas de error que los medios de transmisión clásicos, y su tasa de errores aleatorios es muy baja.

La probabilidad de pérdida de células causada por la función de conmutación ATM es baja pero no nula, dada la posibilidad de congestión. La pérdida de una célula puede verse como una ráfaga de ceros (256 si la información tiene 32 octetos). Para una tasa de pérdida de células global de 10^{-9} , la VRC definida para tramas HDLC da una probabilidad de $1,5 \times 10^{-14}$ de que no se detecte la pérdida de una célula.

Multiplexación

La multiplexación y la función de direccionamiento asociada se incluyen en los recientes protocolos CCITT de nivel 2 derivados

Figura 2
Estructura del cuerpo útil de una célula de datos.



del HDLC, tales como el LAPD (véase Recomendación Q.921 del CCITT), aplicado en las líneas de acceso de abonados RDSI de banda estrecha. El ATM ofrece funciones equivalentes por su propia naturaleza: la función de direccionamiento por etiquetas de las células ATM incluye la multiplexación.

Hacia un nuevo protocolo de nivel de transmisión

A la vista de lo expuesto, resulta interesante definir un protocolo de transmisión que se aproveche de las propiedades del ATM. Se están analizando tres propuestas: el HDLC, un protocolo orientado a la célula, y un protocolo concebido para ATM.

HDLC

En esta propuesta, la información de usuario a transmitir se encapsula primero en una trama HDLC, según se define en las normas HDLC. El control del error a través de la secuencia de verificación de trama (VRC) es, en este caso, global para la trama entera. Las tramas HDLC resultantes se segmentan para que entren en células ATM para su transmisión, y se reensamblan a partir de células ATM en la recepción. La última célula transmitida de una trama HDLC dada se rellena con "unos binarios", si es necesario.

La principal ventaja de esta solución es el uso de normas HDLC y pastillas VLSI existentes. Sin embargo, tiene el inconveniente de no aprovechar bien las características del ATM, ya que las dos estructuras de transporte se superponen y ello es innecesario pues cada una es completa en sí misma. En un enlace dado, se pueden multiplexar muchas comunicaciones de datos (según las especificaciones, hasta 2¹⁶), y por ello es preciso desentrelazar las distintas células recibidas y asignar cada una de ellas a la trama HDLC correcta para calcular la secuencia de verificación de trama global. Esta función puede ser compleja y requiere circuitos especializados en los acopladores de comunicación. La

espera de la última célula de una trama para calcular la VRC y detectar posibles errores exige el almacenamiento de mensajes largos que tal vez tendrán que desecharse si contienen errores, resultando una gestión poco eficiente de la memoria también.

La velocidad útil se encuentra aquí limitada por las pastillas HDLC disponibles (las más recientes llegan sólo hasta algunos Mbit/s). Además, su eficacia total está afectada por la justificación, pues la longitud real depende del contenido de la información de usuario.

Protocolo concebido para el uso de células

Con un protocolo de nivel de transmisión basado en células (2.1), la información de usuario debe previamente formarse en segmentos que encajen dentro del cuerpo útil de una célula. La unidad de datos de usuario es aquí la célula (aun cuando el mensaje comprenda varias células) y la red procesa solamente la VRC de cada célula. Como el usuario ha de segmentar sus datos para que quepan en el referido cuerpo de la célula, no es preciso definir nuevos campos específicos que delimiten la información de usuario al nivel de transmisión. Se incluye un campo único de secuencia de verificación de trama al final del cuerpo útil para la detección de errores.

La principal ventaja de este método es la simplicidad del equipo, que solamente es necesario para el cálculo de la VRC. Esta solución está optimizada para mensajes cortos, por lo que es especialmente adecuada para señalización de usuario o de red, en la que la mayoría de los mensajes encajan en una sola célula.

No está, sin embargo, optimizada la solución anterior para la transferencia de los largos mensajes de información de usuario propios de las comunicaciones de alto rendimiento, ya que la información de una célula ATM es pequeña y se necesitan gran número de ellas para transmitir un mensaje largo. Además, la información de cada célula ha de ser procesada por programa en el extremo receptor, lo que limita la capacidad global de tratamiento de los

acopladores de comunicaciones, sobre todo a causa de la sobrecarga de proceso en células pequeñas. Este es el único caso en que el usuario numera las células, logrando su total transparencia ante la red.

Protocolo orientado al ATM

La tercera solución, compromiso entre las dos anteriores, requiere la definición de un nivel multicélula 2.1 adaptado a las características ATM. Esto no entraña el paso intermedio de encapsular mensajes de usuario en tramas HDLC, ni el lento tratamiento de mensajes largos al nivel de usuario.

Principios: una célula ATM consta de dos campos de longitud fija: el encabezamiento ATM, que identifica y encamina la célula, y el cuerpo útil, que se reserva para el transporte de información de usuario (Fig. 1a). Dicho cuerpo, a su vez, se estructura en dos partes: la *parte de adaptación* con información de protocolo para transmisión de la información de usuario por una red ATM, y la *parte de usuario* que transporta esa información de un modo transparente.

Dos campos de adaptación, un *encabezamiento* (HD) y una *cola* (TR) se introducen en el cuerpo útil de cada célula. La cola es una secuencia de verificación de trama ó VRC de dos octetos que protege todo el cuerpo de la célula, pero no el encabezamiento ATM. El HD ocupa el primer octeto del cuerpo útil, y se emplea para controlar la segmentación de la información en células y reconstruir un mensaje de información a partir de las células recibidas.

Uno de los campos del HD (tipo de célula) define la segmentación del mensaje de información de usuario dentro del cuerpo útil, indicando:

- comienzo del mensaje
- fin del mensaje
- continuación de mensaje
- mensaje de una sola célula.

El encabezamiento tiene dos campos más. Uno, el de *número de secuencia*, numera la célula sobre un circuito virtual dado. Un mensaje de información de usuario es una secuencia de células numeradas, con una VRC por célula y el mismo encabezamiento ATM. El otro campo es un *indicador de presencia de longitud*, que indica si existe o no *campo de longitud*, y en caso de que lo haya especifica la longitud (octetos) de los datos de usuario útiles dentro de la célula.

Codificación: la elección entre una VRC de uno o dos octetos depende de la protección que se necesite. Una VRC-8 detecta un grupo de 8 bits erróneos sucesivos (o menos), así como todos los errores indivi-

duales y un número impar de errores. La probabilidad de que una ráfaga de 9 bits no se detecte es de 2^{-7} , y para ráfagas más largas resulta ser de 2^{-8} .

Para comunicaciones internas dentro de un nodo, la VRC-8 es quizá suficiente, si bien para transferencia de datos extremo a extremo entre usuarios es más segura la VRC-16, y ha sido adoptada por el protocolo propuesto. La mayor sobrecarga (2 octetos por célula) se compensa con una eficiente gestión de la memoria tampón, ya que los errores que afecten a una célula se detectan inmediatamente en la recepción, bien por la VRC o por el número de secuencia. La codificación del encabezamiento de control se indica en la figura 1c.

El *campo del número* contiene el número de secuencia de una célula en módulo 32, relativo al circuito virtual.

La figura 2 muestra la estructura del cuerpo útil de una célula de datos. Si la

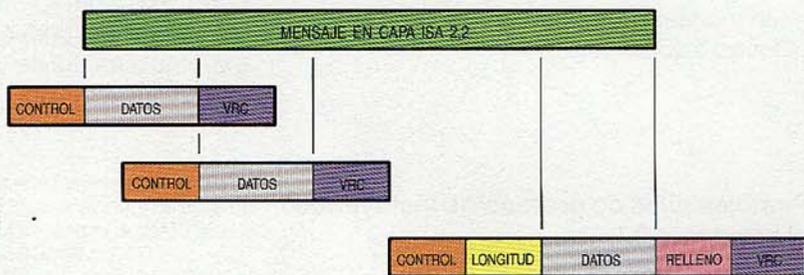


Figura 3
Transporte de una trama multicélula: "control" representa el encabezamiento de adaptación, "datos" la parte de usuario y "VRC" la cola de adaptación.

longitud del mensaje de información de usuario es menor que la longitud del campo de datos disponible, se rellena con "unos" binarios, y el octeto de *longitud* expresa el número de octetos de mensaje de usuario que lleva la célula.

El transporte de una trama multicelular se ilustra en la figura 3. El encabezamiento de adaptación podría estructurarse en una parte genérica y otra específica del servicio. La primera — aplicable tanto a datos como a ráfagas de voz — abarcaría las funciones de delimitación (elementos de protocolo para segmentación e indicación de longitud) y señalaría la presencia o ausencia de la parte específica del servicio; esta última, utilizada solamente para transmisión de datos, incluiría los elementos de detección de error (número de secuencia y VRC).

Procedimientos asociados: estos procedimientos son sencillos, siendo su objetivo suministrar al protocolo de nivel superior sólo tramas ya verificadas. Ello significa que todas las VRC de las distintas células son correctas y que no se ha detectado pérdida de células intermedias.

El envío es muy sencillo:

- la información se segmenta en bloques de N octetos (N es menor o igual que 28 ó 29 octetos)
- el encabezamiento de control se añade antes de cada bloque (bits B, E y LI)
- la VRC se calcula e inserta tras el bloque de datos de usuario.

El lado receptor ejecuta el siguiente procedimiento:

- verifica la VRC y el número de secuencia de cada célula y desecha las células con fallo
- detecta el defecto/exceso de células
- reinicia el proceso de recepción y elimina la información recibida no útil en caso de haber detectado error
- entrega mensajes individuales correctos a su destino
- ensambla células correctas para formar un mensaje completo, que se entrega luego a su destino.

Posibles pilas de protocolos incluyendo el protocolo 2.1

Hasta ahora se han definido dos pilas de protocolos que incluyen el protocolo 2.1:

- protocolo LAP 2.2 para comunicaciones extremo a extremo entre usuarios y señalización
- protocolo de transferencia para comunicaciones internas entre los procesadores de una central ATM.

Podría dejarse de detectar la pérdida de más de 32 células consecutivas en el mismo circuito virtual, aunque la probabilidad de que esto suceda es lo suficientemente baja como para considerar al servicio 2.1 compatible con el 2.2 ó con los requisitos de servicios de transferencia.

Tal vez tengan que diseñarse nuevos protocolos extremo a extremo que se ejecuten a un subnivel superior del nivel 2, y a

niveles superiores, con el fin de alcanzar los 10 Mbit/s de velocidad efectiva de transferencia memoria a memoria.

Conclusiones

Las técnicas ATM en las redes de telecomunicación posibilitarán la introducción de comunicaciones de datos a gran velocidad para usuarios y nodos de red ATM. Los protocolos de menor nivel existentes no aprovechan al máximo las características del ATM (células pequeñas, ganancia o pérdida de células, ausencia de control de flujo, etc.). Por el contrario, el protocolo de nivel 2.1 propuesto permite transferir los datos en unidades grandes y detectar los errores durante su transmisión de un modo sencillo, sólido y eficaz. Se adapta bien a los formatos de las células y permite un suave desentrelazado sin necesidad de equipo especializado. El protocolo puede utilizarse con una pila de protocolos superiores existente (protocolo dividido en niveles sucesivos) para el transporte extremo a extremo a través de una red ATM o en el interior de la misma.

J. Coupaye nació en el norte de Francia, en 1946. Se graduó en ingeniería en la Ecole Centrale de Lyon (1969), y en el Institut de Mathématiques Appliquées de Grenoble (1970). El Sr. Coupaye inició su actividad profesional en CII, en 1971, trabajando en el soporte lógico (sistema operativo) del IRIS-80, y luego se trasladó a Thomson-CSF donde se dedicó a desarrollo de programación y al proyecto ECRINS con France Telecom. Desde 1987 es responsable del diseño de soporte lógico en el centro de investigación sobre banda ancha de Alcatel CIT.

Gérard Gastaud nació en Golfe-Juan, Francia, en 1944. Se graduó en ingeniería por la Ecole Supérieure d'Electricité, París, en 1966. Dos años después entró en LMT, donde se encargó del desarrollo de un simulador de central telefónica. Desde 1987 el Sr. Gastaud es responsable de todo lo relacionado con datos en el centro de investigaciones de banda ancha de Alcatel CIT.

Gérard Le Bihan nació en St. Pol de Leon, Francia, en 1958. Se graduó en ingeniería de telecomunicaciones por la Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications en 1980. El Sr. Le Bihan ingresó en Alcatel CIT en 1981, dedicándose inicialmente al desarrollo del sistema Alcatel E10. Durante los cuatro últimos años ha sido miembro del grupo de diseño de sistemas, y actualmente trabaja en el diseño del sistema ATM en el centro de investigaciones de banda ancha de Alcatel CIT.

Arquitectura de redes locales y urbanas de fibra óptica para transmisión óptica coherente

Las futuras redes de banda ancha van a utilizar mucho los sistemas de transmisión coherente por fibra óptica. Estos sistemas se caracterizarán por nuevos esquemas de gestión dirigidos a explotar los numerosos servicios nuevos de acuerdo con su anchura de banda.

A. Fioretti
C. A. Rocchini
S. R. Treves

Centro de Investigación de Alcatel FACE,
Pomezia, Italia

L. Torchin
Laboratoires de Marcoussis, Marcoussis,

Introducción

Los principales logros de las redes coherentes serán su capacidad, su propia naturaleza multiservicio, y su extensión geográfica. Tales redes tendrán una anchura de banda total de varios Gbit/s, deberán admitir todo tipo de servicios y ofrecerán una cobertura geográfica mayor que las redes de área local (RAL) convencionales. Cada uno de estos requisitos afecta en cierto grado a la topología. En las RAL de fibra óptica suele distinguirse entre estructuras que utilizan acopladores ópticos para formar un nodo de distribución pasiva y aquellas otras en las que los nodos activos se unen por un anillo de fibra. Las primeras presentan varias ventajas en cuanto a flexibilidad y fiabilidad de la red, pero la simplificación de los terminales de la red como contrapartida exige una compleja ordenación de los mensajes y cumplir rigurosos requisitos electroópticos.

La alta capacidad está tradicionalmente sujeta a limitaciones tecnológicas en las velocidades de transmisión en banda base. La naturaleza multicanal de una red coherente permite superar estas limitaciones, aunque la mayor complejidad del equipo físico sólo hace factible esta solución dentro de una red esencialmente pasiva en la que cada terminal satisface la demanda de su tráfico local, en vez de tener que soportar la carga entera de la red. Así pues, si bien la detección coherente ofrece mejores prestaciones del receptor óptico en cuanto a sensibilidad y margen dinámico, la índole multicanal del entorno operativo complica la gestión del tiempo y de las tareas. Sucede lo mismo con los sistemas de banda de base¹, en los que se demultiplexan las

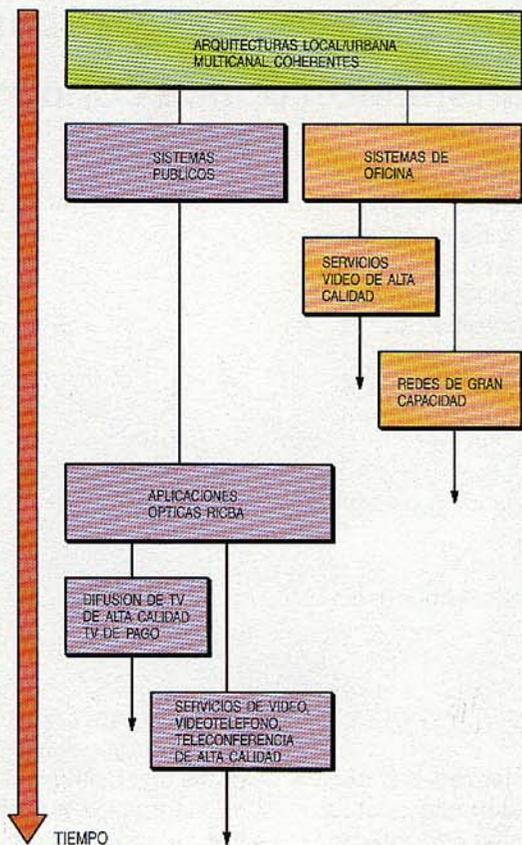
longitudes de onda discretas a la entrada del receptor por medios ópticos clásicos como dispositivos Fabry-Pérot o redes difractoras. Se han alcanzado ya separaciones del orden de nanómetros en estas estructuras. Debido a la mejor discriminación de los canales, las redes coherentes permiten separaciones ópticas diez veces menores entre canales adyacentes.

La integración de cualquier número de servicios y de usuarios con altas y bajas capacidades requiere un procedimiento de multiplexación flexible, que se lleve a cabo aprovechando el hecho de que la única parte "difusora" de la topología sea el centro del nodo de distribución².

Una extensa cobertura geográfica requiere bajas pérdidas de transmisión. Ambos conceptos, actualmente en estudio para la capa física, se apoyan en una topología en estrella que permite la interconexión pasiva de terminales. Como los terminales no son parte del medio de transmisión, no se les exige una fiabilidad tan elevada como en las topologías en bus o anillo de los sistemas actuales.

Finalmente, debe también destacarse que las técnicas coherentes han demostrado ya en laboratorio que pueden lograr grandes mejoras en la sensibilidad del receptor con respecto a los métodos de detección directa, lo que permite que el número de estaciones en la red pueda ser mucho mayor. Mientras que las redes basadas en multiplexación en longitud de onda juntamente con la detección directa parecen estar limitadas a 100 estaciones conectadas a la estrella central (100 longitudes de onda), a largo plazo las redes coherentes deberían permitir aumentar considerablemente este número.

Figura 1
Aplicaciones potenciales.



La transmisión coherente ofrece, pues, una serie de ventajas frente a los métodos de detección directa:

- mejor producto distancia x anchura de banda
- mayor sensibilidad del receptor
- más extenso margen dinámico óptico.

Esto permite acrecentar la velocidad de transmisión (hasta varias decenas de Gbit/s), conectar centenares de terminales a la misma estrella, facilitar la reconfiguración y ampliar la cobertura geográfica, todo lo cual hace que los sistemas de transmisión coherente sean especialmente idóneos para los futuros servicios de banda ancha.

Las aplicaciones de este tipo de sistema son primordialmente en el campo de los

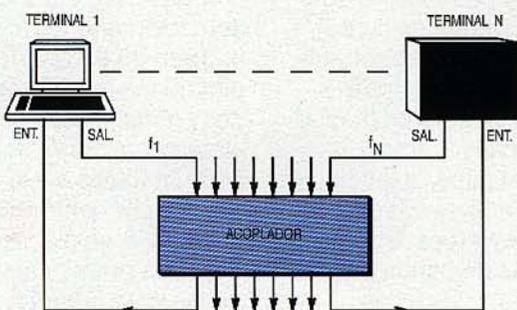


Figura 2
La arquitectura OMNETS.

sistemas de comunicación de vídeo privados y públicos. El abanico de aplicaciones potenciales es grande, como refleja la figura 1, indicando la posible evolución de las mismas. Seguidamente se dan dos ejemplos.

Telepuertos (redes de banda ancha privada): los usuarios (empresas) de un telepuerto pueden complementar los servicios de la red pública introduciendo nuevos servicios de banda ancha antes de que puedan ofrecerlos las entidades explotadoras.

Redes de área metropolitana: Alcatel FACE, SIP (explotador de telecomunicación italiano), y la Universidad de Florencia, han instalado ya el "Proyecto Fiore", una isla óptica que enlaza varios lugares de la Universidad (centro de proceso de datos, centro audiovisual, facultades de ingeniería, edificio administrativo, hospital médico radiológico, hospital ortopédico y Palacio de Congresos), permitiendo desarrollar aplicaciones científicas innovadoras.

Las características de las redes coherentes y su capacidad para sustentar servicios de banda ancha, las convierten en candidatos ideales para las siguientes etapas de evolución en dichos proyectos.

En cuanto a la propia red pública, uno de los objetivos del programa RACE es estudiar la manera de materializar las técnicas coherentes en las futuras redes integradas de banda ancha. Aunque todavía no se pueda fijar el momento de su introducción, sí se sabe que estas técnicas se abrirán paso en la red pública de banda ancha.

Capa física

Se estudian actualmente dos posibles alternativas para la capa física. Una de ellas, denominada OMNETS (red óptica multicanal basada en fuentes eléctricamente sintonizables), se apoya en la estabilización eléctrica de portadoras ópticas, mientras que la otra, la UCOL, realiza la distribución sobre una línea de referencia común.

OMNETS

Cierto número de estudios³ y evaluaciones teóricas⁴ han sugerido recientemente la factibilidad de producir fuentes láser de semiconductores sintonizables eléctricamente. La capacidad de sintonizar en un margen espectral de algunos nanómetros se consigue implantando una cavidad compuesta de tres secciones sobre el sustrato de InP. Además, en un futuro cercano se prevé el funcionamiento monomodo con

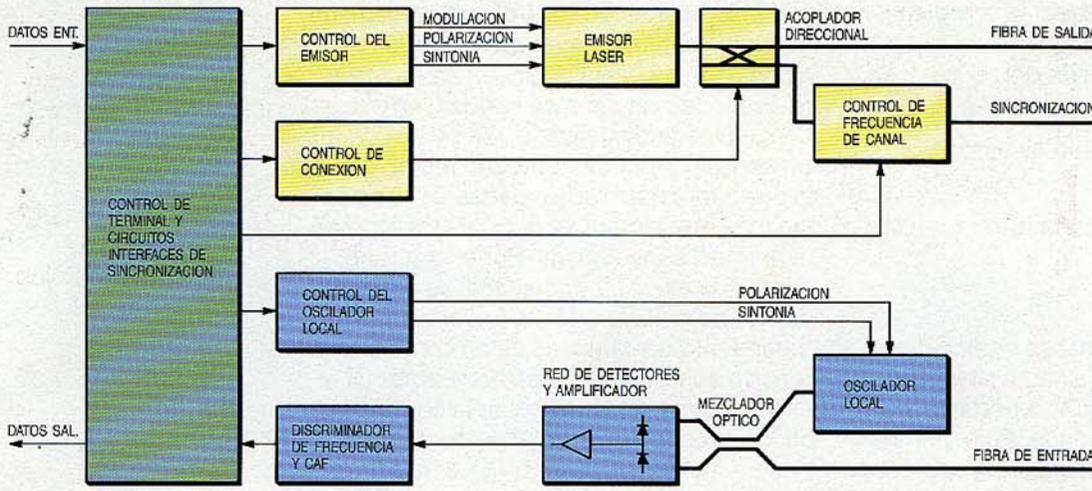


Figura 3
Disposición funcional de un terminal de red.

láseres de raya espectral de 1 MHz, directamente modulables por desplazamiento de frecuencia (MDF) y de respuesta plana. Estas características hacen atractivo dicho componente para un amplio margen de aplicaciones, especialmente para las RAL de fibra óptica, incluida la OMNETS.

La figura 2 muestra la arquitectura OMNETS, en la que una estrella pasiva de fibra óptica interconecta terminales equipados con láseres semiconductores sintonizables eléctricamente. El acoplador central mezcla las señales ópticas procedentes de todos los terminales, con lo que todas ellas están presentes en la entrada de cada receptor. La transmisión de datos se basa en la multiplexación de las frecuencias ópticas, utilizando una frecuencia óptica portadora para cada comunicación entre dos terminales. La posibilidad de sintonizar en frecuencia cada fuente permite asignar los canales de un modo dinámico. La transmisión digital se realiza por modulación MDF de las portadoras ópticas de raya espectral estrecha; un mezclador heterodino en el extremo receptor permite un filtrado de alta selectividad para discriminación de canales y demodulación MDF.

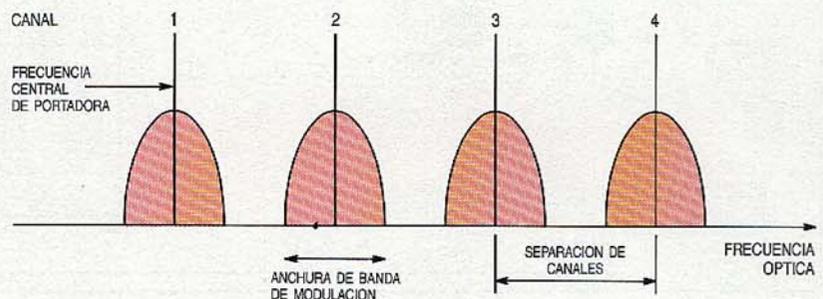
En los Laboratoires de Marcoussis se está estudiando un prototipo de red OMNETS. Como muestra la figura 3, cada terminal de la red consta de un transmisor (emisor láser con su control, conmutador óptico), un receptor (oscilador local con su control, mezclador óptico, red de detectores y circuito de demodulación), y un sistema de sincronización.

El emisor láser está gobernado por tres electrodos: uno para la corriente de polarización que controla la potencia de salida, otro para la corriente de sintonización que fija la frecuencia portadora óptica, y otro para la corriente de modulación en banda de base que modula directamente en MDF la portadora óptica. Un conmutador óptico

(p. ej., acoplador direccional) permite conectar el emisor a la red a través de la fibra de salida. Un sistema de control de frecuencia de canal fija y estabiliza la frecuencia de la portadora óptica del emisor antes de su conexión a la red y a lo largo de la misma. El diseño del sistema de control depende de la distribución de frecuencias en la red, de las reglas de asignación de canales y del grado de centralización de la organización de la red. Se está estudiando la posibilidad de utilizar una frecuencia óptica de referencia absoluta que proceda de un canal externo, así como la estabilización eléctrica de la separación entre canales, aunque todavía sea pronto para definir métodos prácticos. En la figura 3 se indica una entrada (eléctrica u óptica) de sincronización y una conexión óptica al emisor, como configuración simbólica del control de frecuencia de canal.

En el receptor, un mezclador óptico con diversidad de polarización⁵ combina la señal óptica procedente de la fibra de entrada con la señal del oscilador local. La señal eléctrica, a la frecuencia intermedia, genera una red de detectores equilibrados⁶ antes de la demodulación. El láser del oscilador local se sintoniza en frecuencia mediante un circuito de control o puede enclavarse por control automático de

Figura 4
Tabla de frecuencias de la red multicanal coherente.



frecuencia. La figura 4 presenta una distribución típica de frecuencias.

Dentro de la organización del terminal se han señalado tres funciones típicas:

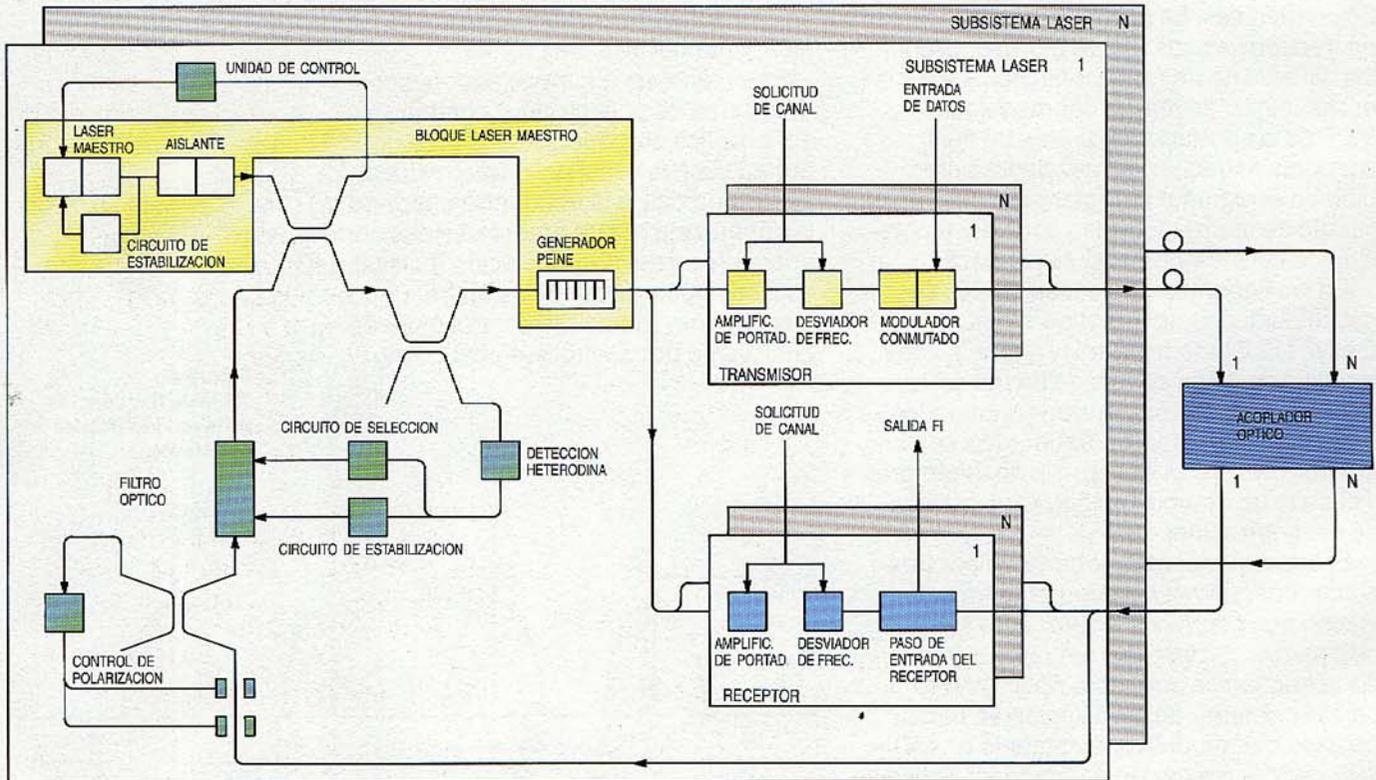
- funciones de tratamiento de llamada y asignación de canal
- fijación y estabilización de la frecuencia portadora óptica
- transmisión de datos.

Para la asignación de canal se dedica una frecuencia portadora fija a cada canal, o bien se asigna una frecuencia portadora "instantánea" a cada llamada. En el primer caso, la operación del emisor o del oscilador local a frecuencia óptica fija requiere el registro permanente del valor exacto de la frecuencia óptica y el enclavamiento del circuito de control a una referencia óptica generando una señal eléctrica de corrección. Se han propuesto y probado varias soluciones que utilizan un dispositivo de control de frecuencia centralizado, basado en una fuente láser de referencia⁷ o en un interferómetro de barrido Fabry-Pérot⁸. En el segundo caso, no se necesita determinar con precisión las frecuencias portadoras ópticas, pero hay que comprobar la separación entre canales antes del comienzo de una llamada y de la conexión del terminal a la red, a fin de que la interferencia relativa inducida entre canales permanezca aceptable en el receptor.

Las funciones de tratamiento de llamada, están fuertemente ligadas al principio de asignación de canal. Como cada receptor recibe todas las señales ópticas, en el caso de canales especializados se puede seguir un sencillo procedimiento de detección de la portadora para recibir o realizar llamadas, sin más que sintonizar el oscilador local en el margen espectral útil. Por el contrario, cuando la asignación de canal es dinámica, se han de realizar nuevas funciones de tratamiento de llamadas, tales como el reparto de frecuencias en cada terminal, y ello aumenta sensiblemente la complejidad de los circuitos de control del terminal.

Se están estudiando los diversos aspectos operativos con el fin de comparar las posibles soluciones técnicas. La precisión del control de las frecuencias portadoras ópticas sufre limitaciones fundamentales, sobre todo la variación con la temperatura de la longitud de onda emitida por los cambios en el índice de refracción de la capa activa de los láseres semiconductores (15 GHz/K). Parece una idea más flexible estabilizar la separación entre canales para poder explotar la red con eficacia que la de intentar una absoluta estabilización de la frecuencia de cada láser. Los procedimientos de tratamiento de llamada se asemejan a los elaborados para aplicaciones como los sistemas de comunicaciones móviles, pero podrán ser afectados por limitaciones tecnológicas. Finalmente, se tiene que

Figura 5
UCOL: esquema de la configuración del equipo óptico.



demostrar la viabilidad del desarrollo de fuentes láseres sintonizables y de bajo coste. Los nuevos progresos tecnológicos en la integración monolítica sobre sustratos de InP son la clave de la evolución futura de OMNETS.

La calidad final de esta capa física dependerá principalmente del desarrollo de láseres de raya espectral suficientemente estrecha (del orden de 1 MHz) y de su margen de sintonización. Suponiendo una sintonía continua sobre un margen de 5 nm (alrededor de 600 GHz a $1,55 \mu\text{m}$) y una raya espectral en torno a 20 MHz, que debería conseguirse dentro de pocos años, es forzoso utilizar la MDF de gran desviación. Esto implica que se ha de mantener una separación mínima al menos de diez veces la velocidad binaria entre los canales adyacentes, incluyendo el necesario margen de frecuencia para protegerse de la diafonía producida por la deriva de la frecuencia óptica. A 140 ó 560 Mbit/s, las redes equipadas con estos componentes optoelectrónicos tendrán una capacidad de 100 terminales aproximadamente.

Los componentes de la próxima generación tendrán mucho menor anchura espectral, lo que permitirá aplicar una MDF de pequeña desviación y reducir la separación de canales hasta tres a cuatro veces su velocidad binaria. El número de canales posibles será así de varios centenares, por otra parte compatible con las pérdidas ópticas propias de la estructura en estrella. Se puede conseguir esto sin amplificación óptica alguna. La capacidad podría elevarse interconectando redes en estrella.

Arquitectura UCOL

La arquitectura UCOL (red de área local óptica ultracoherente) está en desarrollo por un consorcio ESPRIT, cuyo contratista principal es el Centro de Investigación de Alcatel FACE. Recientemente se ha concluido el estudio inicial de factibilidad.

La figura 5 muestra el montaje óptico UCOL para una red en estrella aislada que funciona a $1,55 \mu\text{m}$. Dentro de cada subsistema láser se obtiene un "peine" de portadoras ópticas (conjunto de portadoras equiparadas en frecuencia) a partir de un láser maestro compartido por varias estaciones. Modulando en fase la salida del láser maestro de raya estrecha se produce el peine de frecuencias, a cuyas frecuencias se enclavan los diversos láseres fuentes y locales. La ventaja de este método frente a los láseres multifrecuencia es que se puede definir exactamente la separación de portadoras y mantener la estrecha raya espectral. En tal sistema es importante alimentar un máximo número de estaciones transmisoras y receptoras desde un solo láser maes-

tro, y minimizar la potencia de excitación RF requerida por el dispositivo. Por lo tanto, la eficacia de conversión del láser maestro a las bandas laterales, la potencia RF de excitación necesaria, las pérdidas ópticas y la adaptación del nivel de las bandas laterales, son los factores clave en la elección del dispositivo óptimo. Se han estudiado estructuras de electrodos para este tipo de dispositivo, que requiere un alto rendimiento electroóptico para débil potencia de excitación, aunque sólo en un estrecho margen de frecuencia. Se ha determinado la estructura de dispositivo óptima para esta aplicación, que exige el funcionamiento en banda estrecha.

Los dispositivos más eficaces encontrados fueron del tipo de onda progresiva síncrona. Experimentalmente se pudo obtener cinco portadoras con potencia de excitación en torno a 30 dBm.

El número de interfaces de red (pares transmisor-receptor) en cada subsistema depende de la topología de la red. Cada interfaz se alimenta por el lado de emisión y por el de recepción con el conjunto de los cinco armónicos generados por el módulo láser maestro. En cada interfaz de red se selecciona el armónico deseado, y después las unidades de ajuste fino de frecuencia producen la portadora del canal óptico deseado.

El lado de recepción se basa en la misma arquitectura. La portadora del oscilador local se deriva del mismo láser maestro. El modulador de datos es reemplazado por circuitos electroópticos, detectando y amplificando el batido entre las frecuencias de la señal de entrada y del oscilador local. El balance de potencia calculado ha obligado a introducir amplificación para restituir el nivel de portadora antes de su modulación y su acoplamiento a la sección de interconexión pasiva de la red.

Se eligió modulación por desplazamiento de fase (MDP) bivalente para el sistema de referencia definido durante el estudio de factibilidad, por ser la que necesita mínima potencia óptica para una probabilidad de error dada.

La detección óptica coherente utiliza una fotocorriente que es proporcional al campo eléctrico de la señal. Así pues, el término en E^2 de banda de base residual que constituye la componente de detección directa, es un parásito indeseado. La influencia de este componente parásito se reduce todavía más adoptando un formato de modulación angular (a intensidad constante). La modulación MDP proporciona un espectro compacto y una elevada sensibilidad en el receptor.

La modulación MDP diferencial (MDPD) presenta unas buenas características de

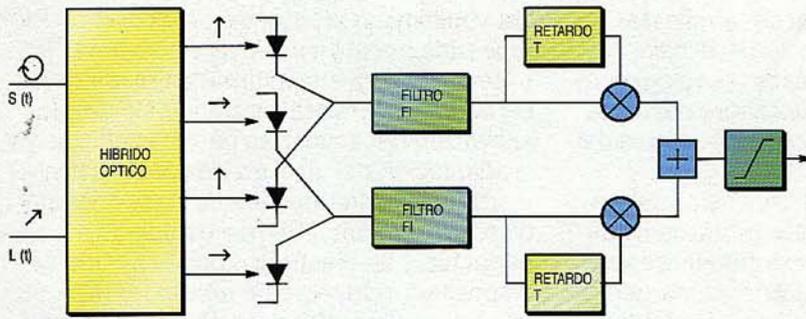


Figura 6
UCOL: esquema del receptor.

demodulación y es fácil de realizar, pues no necesita de complejos circuitos para la recuperación de la portadora. El procedimiento de detección MDPD utilizado en la red UCOL requiere una anchura de raya espectral del láser inferior al 0,5% de la velocidad binaria, lo que corresponde aproximadamente a 450 kHz en el sistema de 140 Mbit/s considerado.

Los láseres comerciales de realimentación distribuida tienen anchura espectral de decenas de MHz, claramente excesivas para la red UCOL. Como se han notificado valores de raya espectral muy bajos, hasta de 10 kHz, en láseres de larga cavidad externa, se decidió diseñar el láser maestro partiendo de este principio. Para poder trabajar en red, los receptores deben presentar una serie de características esenciales, que junto con las limitaciones básicas del proceso de detección han conducido a adoptar la solución más favorable y a construir satisfactoriamente un modelo de demostración en laboratorio del principio de detección.

Las exigencias acerca del tiempo de respuesta del receptor en un entorno multi-canal y multiusuario deben ser rigurosas para no comprometer la eficacia de la red. Desde el primer momento, fue objetivo principal una rápida respuesta entre mensajes, y ello ha tenido importantes consecuen-

cias en el diseño del receptor, sobre todo en cuanto a la necesidad de:

- rápida adquisición de la polarización
- rápida sincronización de la portadora
- rápida sincronización de símbolos.

Pese a haber propuesto varios métodos de control de polarización, no parece que cualquiera de ellos pueda ofrecer una respuesta rápida sin una penalización de potencia sustancial. Por consiguiente, en el seno del proyecto UCOL se decidió estudiar un procedimiento de diversidad de polarización para detectar independientemente los componentes ortogonales del campo de la onda de entrada, asegurando así la insensibilidad a la polarización. En este método las salidas detectadas no dependen de la fase recuperada, por lo que se requiere operación heterodina.

La sincronización de fase de una portadora local posibilita el uso de una detección lineal que minimiza la degradación de la señal por el ruido de banda ancha aditivo. Sin embargo, aceptando una ligera reducción de la sensibilidad, esencialmente puede realizarse el mismo proceso con la codificación diferencial, que prescinde de circuitos de adquisición complejos y forzosamente lentos.

La localización de varias portadoras ópticas dentro de la misma región espectral impone nuevas exigencias al diseño del receptor. Particularmente se ha prestado atención a los factores que gobiernan el rechazo de señales de canales adyacentes. Se utilizan parejas de detectores equilibrados para reducir sustancialmente la influencia de la componente parásita en banda de base del receptor y el ruido de intensidad del oscilador local.

La adopción de la diversidad de polarización como objetivo de diseño obliga a realizar un preproceso óptico en el receptor puesto que, además de la común necesidad de acoplador pasivo para la superposición del campo del oscilador local y de la señal, se requiere un medio para separar las componentes ortogonales. La realización de tales dispositivos en guías de ondas ranuradas (p. ej., basados en acopladores X inversos⁹, fabricados en LiNbO₃) parece ser la mejor solución, ya que permite la integración híbrida completa de los componentes de entrada críticos. La figura 6 es un diagrama de bloques en el receptor.

Para conseguir la anchura de banda del receptor que necesita el funcionamiento heterodino, es esencial minimizar la capacidad parásita asociada a los fotodiodos en el nodo de entrada al amplificador, lo que obliga a utilizar técnicas de película gruesa para lograr separaciones muy pequeñas

Tabla 1 - Principales características del sistema de demostración

<p><i>Capa física:</i></p> <p>Topología en estrella</p> <p>Las distancias del centro de la estrella a los interfaces de red individuales varían entre 0,5 y 10 km</p> <p>Número total de interfaces de red: 8 (a ser asignados sobre 3 estaciones)</p> <p>Interfaz de red individual sintonizable sobre 25 canales ópticos</p> <p>Modulación digital MDP</p> <p>Velocidad binaria de canal, 140 Mbit/s</p> <p>Esquema de detección diferencial con detección heterodina por diversidad de polarización</p> <p>Alto rendimiento espectral (35%)</p>
--

entre componentes y un preciso trazado del circuito.

La salida del preamplificador óptico, consiste en señales de doble banda lateral de bajo nivel y portadora suprimida, que deben ser amplificadas y después procesadas para dar una salida independiente de la polarización. Se necesita, pues, un segundo tipo de subsistemas puramente electrónicos.

Para que la respuesta del receptor se pueda acomodar a una gama de potencias ópticas de entrada, se aplicarán simultáneamente circuitos lineales de CAG (control automático de ganancia) a ambos canales del procesador RF. Es importante una respuesta rápida a las variaciones de nivel de entrada si no se quiere comprometer el tiempo de respuesta entre paquetes. El proceso de decodificación diferencial se realizará mediante multiplicación retardada, obteniendo una señal proporcional a la potencia que permitirá reconstruir una salida independiente de la polarización.

Según los estudios teóricos realizados sobre cada elemento básico de la red UCOL, unidos al trabajo experimental sobre tres de los más importantes bloques del sistema (fuente de raya estrecha, generador peine y receptor), la estructura física requerida para la explotación de la red parece factible y capaz de proporcionar las altas prestaciones necesarias. La tabla 1 resume las principales características de la capa física del sistema de demostración previsto.

Explotación de la red

Hasta este momento, se ha estudiado la explotación de la red para la arquitectura UCOL durante la fase de definición de ESPRIT. Sin embargo, en la medida en que el protocolo elaborado cumple plenamente con el modelo ISA, es casi independiente de la estructura de la capa física y debería ser inmediatamente aplicable a la arquitectura OMNETS.

Es posible explotar la configuración en estrella con un protocolo de multiplexación temporal (MDT) de alto rendimiento que regula el acceso a cada frecuencia óptica¹. La división de los canales ópticos individuales en intervalos de tiempo permite una eficaz integración de los servicios; la MDT en cada frecuencia óptica ofrece flexibilidad para asignar las bandas de paso, y por lo tanto para mezclar como convenga usuarios de grande y pequeña anchura de banda. Además, las aplicaciones sensibles al retardo se pueden tratar de acuerdo con sus exigencias.

El protocolo definido dentro del proyecto UCOL ha sido recientemente simulado.

Los resultados muestran que se puede tratar tráfico mixto y que la presencia de varios servicios no afecta a la capacidad del protocolo para enviar paquetes respetando sus requisitos de retardo.

La conmutación entre canales en el dominio de la frecuencia se emplea para asegurar una configuración de red adaptativa y económica, sin modificar el equipo.

Una red que utilice óptica coherente requiere procedimientos de gestión más complejos por su naturaleza multicanal. Hay dos consideraciones importantes cuando se define un esquema para red multicanal:

- asignación y reconfiguración de canales para optimizar el uso de la capacidad global de la red, en retardo/velocidad tanto como en conectividad de la red
- explotación de la capacidad de cada canal, compartiéndolo entre varios usuarios como en las redes convencionales.

De este modo, el procedimiento de gestión está constreñido por limitaciones tecnológicas y por las recomendaciones ISA. Se ha propuesto un método inicial basado en un canal de control separado, tratado por un controlador central^{9,10}, aunque esto no está enteramente conforme con el modelo de gestión ISA¹¹, que utiliza un procedimiento distribuido.

El método de gestión UCOL es ahora compatible con ISA, y está articulado sobre las tres capas más bajas del modelo ISA^{12,13}.

Capa de red

La capa de red debe encaminar los paquetes de información proporcionando a la capa de enlace un conjunto de frecuencias comunes entre la fuente y el destino. Cada estación prepara una "tabla de asignación de frecuencias" y una "tabla de frecuencias comunes". En la primera, cada estación escribe la asignación de frecuencia para todas las demás estaciones, mientras que en la segunda tabla, fácilmente deducible de la primera, se enumeran las frecuencias comunes entre todos los pares de estaciones posibles.

Capa de enlace

Para enviar el paquete, la capa de enlace selecciona el canal común menos cargado. La naturaleza determinista del protocolo permite conocer el número exacto de intervalos de tiempo utilizados, con lo que se determina fácilmente la porción de banda de canal ocupada por el protocolo. La base de datos de gestión proporciona una "tabla de tráfico por intervalos temporales", indicando la porción que ocupa este tráfico en

cada canal. En el caso del protocolo MDT, las rápidas variaciones de la carga de tráfico dificultan la definición de la porción instantánea utilizada de un canal. En consecuencia, cada estación aplica su conocimiento de la longitud media de la cola en el sistema completo para determinar la carga de cada canal. Para lograrlo, la base de datos de gestión proporciona una "tabla de longitudes medias de cola" a los MAC (control de acceso al medio) de MDT, y una "tabla de tráfico MDT" que se obtiene a partir de la recopilación de todas las longitudes medias de las colas del sistema, que expresan la porción del canal utilizada por el tráfico MDT.

Para controlar cada canal, la base de datos de gestión también proporciona una "tabla de tráfico global", derivada de las tablas de "tráfico por intervalos temporales" y "tráfico MDT", en la que se indica el tráfico global en cada canal. Es evidente que la frecuencia con carga mínima en base a la longitud media de la cola del sistema, sólo puede elegirse en el caso de servicios orientados a conexión, en los que puede conocerse el tráfico medio generado después de la conexión. En el caso de los datagramas, donde todos los paquetes son independientes, conviene basar la elección de la mejor frecuencia común en la longitud instantánea de la cola local en cada uno de los canales comunes. Por consiguiente, la base de datos de gestión también proporciona una "tabla de longitudes instantáneas de colas locales" que recoge información procedente de cada MAC de multiplexación temporal.

Conclusiones

Las técnicas de óptica coherente permitirán construir una red con anchura de banda total sensiblemente superior y un tratamiento de la información mejor que los sistemas de banda de base. Se han estudiado dos alternativas de diseño posibles para la capa física.

Se han debatido ciertos aspectos y funciones de una red multicanal de servicios integrados, exponiendo la interacción entre requisitos tecnológicos y la arquitectura de la red. Asimismo se han señalado posibles campos de aplicación, junto con previsiones del volumen de mercado.

Referencias

- 1 C. Lin, H. Kobrinski, A. Frenkel y C. A. Bracket: A Tunable 16 Optical Channel Transmission/Distribution Experiment at 2 Gbit/s and 600 Mbit/s for Broadband Subscriber Distribution: *Proceedings of 14th European Conference on Optical Communication*, 11-15 septiembre 1988, Brighton, Inglaterra.
- 2 A. Fioretti, C. A. Rocchini, P. J. Wilkinson y A. J. Haylett: A New Protocol for Multiservice Integration Over a High Speed Fibre Optic LAN based on Star Topology: *International Federation for Information Processing WG 6.4 Workshop*, 16-17 febrero 1987, Aquisgrán.
- 3 S. Murata, I. Mito y K. Kobayashi: Over 5,8 nm Continuous Wavelength Tuning of 1,5 μm Wavelength Tunable DBR Laser: *Proceedings of Optical Fiber Conference '87*, Reno, 19-22 enero 1987, documento WC-2.
- 4 J. Jacquet, P. Brosson y J. Benoit: Etude Theorique d'un Laser a 3 Sections Permettant une Emission Monomode Continuum Accordable en Longueur d'Onde: *Proceeding of the X^{èmes} Journées Nationales de l'Optique Guidée*, 24-25 marzo 1988, Lannion, pág. 88.
- 5 B. Basch, R. Kearns, G. Joyce, S. Stone y W. Chen: Progress Towards Coherent Fiber Transmission: *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers*, 1985, volumen 568, pág. 2.
- 6 L. Kazovsky: Multichannel Coherent Optical Communication Systems: *Journal of Lightwave Technology*, 1987, volumen LT-5, pág. 1095.
- 7 H. Foisel: Ten-Channel Coherent HDTV/TV Distribution System: *Proceedings of European Conference on Optical Communication '87*, 13-17 septiembre 1987, Helsinki.
- 8 B. Giance, K. Pollock, P. Fitzgerald, C. Burrus, B. Kasper, J. Stone y L. Stulz: Densely Spaced WDM Coherent Star Network with Optical Frequency Stabilization: *Proceedings of OFC '88*, 12-28 enero 1988, Nueva Orleans.
- 9 P. J. Wilkinson, A. J. Haylett, A. Fioretti y C. A. Rocchini: Management of a Multichannel Flexible Integrated Network: *International Federation for Information Processing WG 6.4 Workshop*, 16-17 febrero 1987, Aquisgrán.
- 10 ESPRIT project N° 249: UCOL: Ultra-Wideband Coherent Optical LAN: *Report N° 5: Definition of Network Access Protocol*, págs. 19-42.
- 11 Framework for OSI Management: *European Computer Manufacturers Association Technical Report TR/37*, enero 1987.
- 12 A. Fioretti, C. A. Rocchini, P. J. Wilkinson y A. J. Haylett: Design Issues of OSI Layers in Integrated Services Multichannel Metropolitan and Regional Area Networks: *Proceedings of International Workshop on LAN Management*, julio 1987, Berlín.
- 13 ESPRIT Project NO 249: UCOL: Ultra-Wideband Coherent Optical LAN: *Report No 6: UCOL in an OSI Context*, págs. 1-32.

Alberto Fioretti nació en Ancona, Italia, en 1949. Se graduó en ingeniería electrónica por el Politécnico di Milano, en 1973, y después entró en la Kungliga Tekniska Hogskolan, Estocolmo, donde trabajó en una central telefónica electrónica por división temporal/espacial. Posteriormente trabajó como investigador senior en la Universidad de Essex, Inglaterra, en problemas teóricos relativos al diseño de una central óptica de alta capacidad. En 1979 pasó a Standard Telecommunication Laboratories en el Reino Unido, dedicándose al diseño de sistemas de transmisión por fibra óptica. El Sr. Fioretti dirige actualmente el departamento de sistemas de fibra óptica en el Centro de Investigación de Alcatel FACE en Pomezia, Italia.

Carlo Alberto Rocchini nació en Civitella del Tronto, Teramo, en 1957. Se graduó en ingeniería electrónica por la Universidad de Roma en 1981. Desde mayo de 1984, el Sr. Rocchini trabaja en el Centro de Investigación de Alcatel FACE, Pomezia, en el diseño de redes ópticas, y en particular en el Proyecto ESPRIT sobre redes ópticas coherentes de banda ultra ancha.

Sergio R. Treves nació en Turín, Italia, en 1936, y se graduó en la Politécnica de aquella ciudad en 1960. Ingresó entonces en ITT Federal Laboratories y más tarde trabajó en CGCT en tasación y registro de llamadas, y en FACE-Standard en transmisión MIC, conmutación electrónica y en el sistema CCITT n° 6. Fue jefe de proyecto para un sistema integrado de transmisión y conmutación MIC de ITT, antes de ser nombrado director científico de electrónica en FACE-Standard. En 1977 llegó a ser director técnico del grupo FACE. El Sr. Treves es profesor de comunicaciones eléctricas desde 1968 y ha enseñado conmutación y teoría de tráfico telefónico en el Politécnico de Turín.

Lucien Torchin nació en París, en 1954. Se graduó en la Ecole Polytechnique en 1976 y en la Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications en 1978. Entró en los Laboratoires de Marcoussis donde estudió inicialmente láseres de gas de alta potencia. En 1987 fue nombrado jefe del departamento de fotónica y electrónica, en cuyo puesto el Sr. Torchin es responsable de una serie de actividades relacionadas con sistemas de comunicación submarinos de largo alcance, redes multicanales coherentes, fibra óptica y dispositivos ópticos integrados, y sus aplicaciones.

Investigación y tecnología en microelectrónica

La microelectrónica es clave del desarrollo de productos de telecomunicación cada vez más complejos. Alcatel mantiene una intensa investigación en este área para adquirir una metodología de diseño avanzada y herramientas para el desarrollo de "sistemas VLSI en silicio".

J. Danneels

M. Rahier

Alcatel Bell Telephone, Amberes, Bélgica

A. Mozer

Alcatel SEL, Stuttgart,

República Federal de Alemania

Introducción

La investigación y la maestría en microelectrónica son esenciales para que Alcatel se mantenga en vanguardia en un mercado tan evolutivo como el de telecomunicaciones. Sus actividades de investigación en este campo se dirigen a conseguir metodología y herramientas para el diseño de componentes VLSI avanzados y de "sistemas en silicio". Dado que la tecnología de microelectrónica se acerca a tamaños característicos de submicras para integrar en una pastilla sistemas de complejidad creciente, la metodología y herramientas de diseño VLSI deben asegurar:

- alta productividad de diseño
- corrección inherente, como en el caso de los compiladores de silicio que traducen automáticamente algoritmos a silicio
- cortos plazos de desarrollo.

Tanto metodología como tecnología deben permitir cubrir exigencias de los sistemas de telecomunicación tales como la alta velocidad, alta densidad y el funcionamiento mixto analógico y digital.

Esta estrategia implica que el diseño creativo se desplaza del circuito al sistema. Los diseñadores ya no intervienen al nivel de puertas lógicas sino al de algoritmos. El diseño a nivel sistema tiene la ventaja de poder evaluar muy pronto soluciones alternativas. El silicio se genera luego mediante herramientas de síntesis y compiladores que traducen automáticamente un algoritmo al silicio.

Además del diseño de pastillas VLSI para equipos avanzados de telecomunicaciones, Alcatel sostiene importantes investigaciones sobre métodos de diseño VLSI, herramientas de síntesis, arquitecturas VLSI, metodologías de pruebas, tecnologías de

procesos avanzados y modelado de dispositivos.

Actividad de diseño VLSI en Alcatel

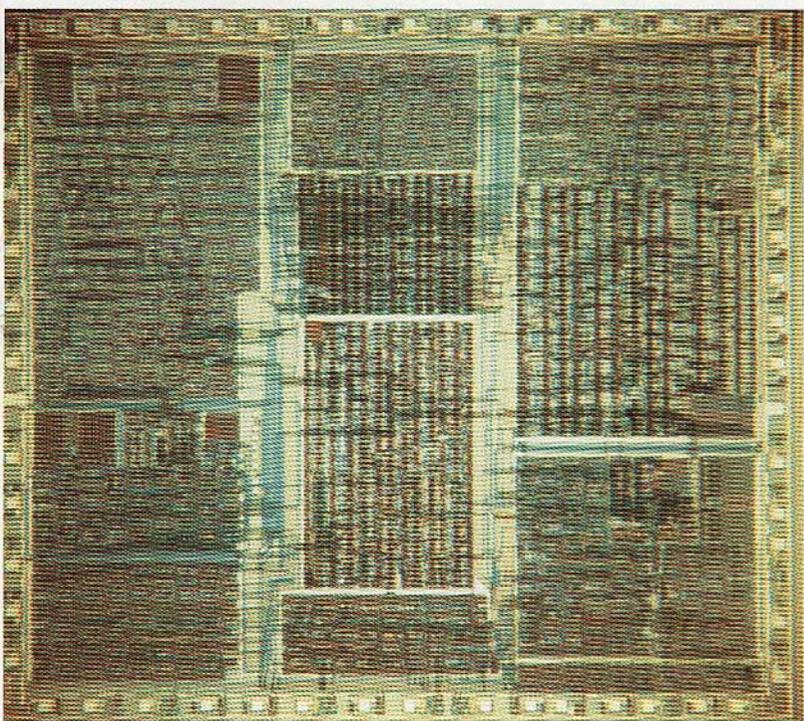
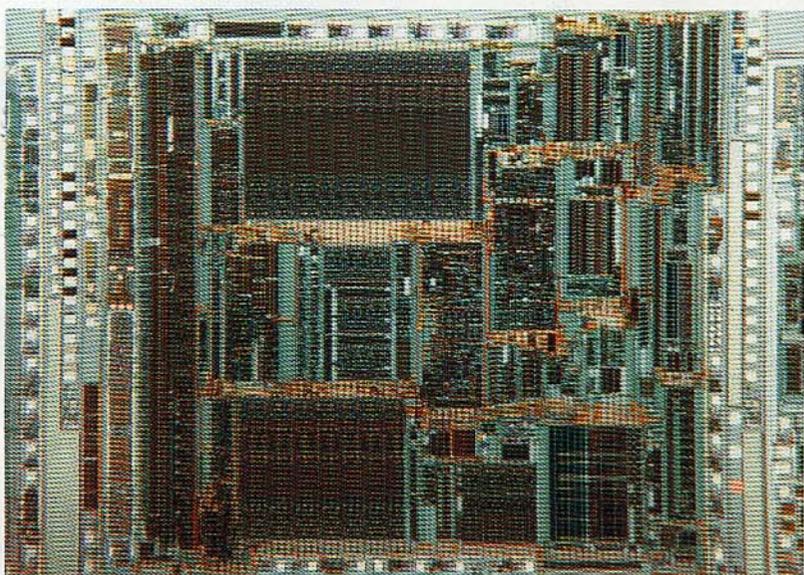
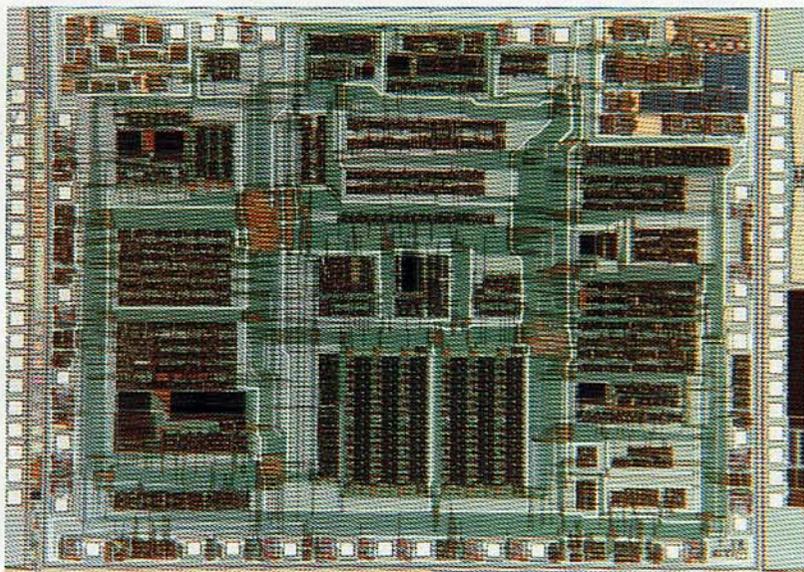
Las aplicaciones VLSI en Alcatel comprenden un juego de pastillas para RDSI de banda estrecha, conmutación RDSI de banda ancha, terminales de radio celular digital, y transmisiones ópticas de alta frecuencia.

Juego de pastillas RDSI de banda estrecha

Se ha desarrollado un juego modular y flexible de pastillas para RDSI, con una partición funcional al nivel de placa y de circuitos integrados basada en arquitectura distribuida. Los tres sistemas VLSI clave en este juego son los transceptores S y U y el coprocesador adaptador de velocidad RDSI.

La pastilla de interfaz S es un circuito transceptor para transmisión de voz y datos, utilizado para conectar equipos de abonado y PABX a la RDSI pública¹. Realiza las funciones de la capa 1 para el interfaz S de acceso básico RDSI de acuerdo con la recomendación I.430 del CCITT. La transmisión es en dúplex total, a 192 kbit/s en pares de transmisión y recepción separados: dos canales B de 64 kbit/s y un canal D de 16 kbit/s se transmiten en ambos sentidos entre una terminación de red y hasta ocho equipos terminales.

El circuito dúplex de interfaz U para el acceso básico² a 2 hilos en la capa 1 a 144 kbit/s, se divide en tres secciones funcionales: entrada analógica, procesadores digitales de señal e interfaz usuario/central. Los procesadores de señal, dispuestos en red sistólica lineal, efectúan todos los cálculos que necesitan las funciones de



compensador de eco, ecualizador, control de ganancia y bucle digital de enganche de fase. La estructura sistólica es en sí muy eficaz por reducir considerablemente los retardos críticos. El interfaz digital asegura el formato, aleatorización, codificación y control de activación en ambos sentidos de transmisión.

Alcatel es el único suministrador de telecomunicaciones que combina analógico y digital en una sola pastilla, el transceptor de interfaz U, y ello es el resultado de largos años de investigación fundamental en diseño de circuitos analógicos, proceso de señal y herramientas de diseño asistido por ordenador.

El coprocesador adaptador de velocidad multiestándar (MSRA) integrado convierte trenes de datos de usuarios síncronos (de 75 bit/s a 64 kbit/s) y asíncronos (hasta 19,2 kbit/s) en canales de datos síncronos a 64 kbit/s. Tiene tres puertos: puerto de línea para interfaz lento, puerto de red para interfaz rápido y puerto de microprocesador para interfaz con ordenador³.

La pastilla del coprocesador adaptador de velocidad se utiliza en unos nuevos adaptadores de terminal universales, caracterizados por un número mínimo de componentes externos, bajo consumo, compatibilidad con la mayoría de normas síncronas y asíncronas y adaptación de múltiples velocidades.

Elemento de conmutación RDSI de banda ancha

La arquitectura propuesta para la futura red integrada de comunicaciones en banda ancha incluye la central ATM (modo de transferencia asíncrono), el equipo de grupo de abonados, la terminación de red y los adaptadores de terminal. En los tres primeros bloques se utiliza el mismo elemento de conmutación de banda ancha. La red de conmutación se conecta, vía interfaz estándar, a módulos especializados con arquitectura de control distribuido, y está constituida por varias etapas de elementos de conmutación de banda ancha. Cada uno de estos

Superior izquierda:
Pastilla del circuito de interfaz S, realizada en tecnología CMOS 1,5 μm , doble metalización, doble polisilicio, sobre un área de 4 x 4 mm y con 15000 transistores.

Centro izquierda:
La pastilla del circuito interfaz U de 28 terminales con aprox. 80000 transistores en un dado de 54 mm², en tecnología CMOS de 2 μm . La versión de 1,5 μm de la misma pastilla ocupa 34 mm².

Inferior izquierda:
Pastilla MSRA realizada en tecnología CMOS de 2 μm de metalización doble. Tiene 68 terminales con 40000 transistores en un área de 45 mm².

elementos (Fig. 1) comprende 16 RTP (puertos de transmisión y recepción), ocho CMC (pastillas de memoria central), un CDC (circuito de distribución de reloj) y un SEC (controlador de elemento de conmutación).

El RTP es responsable de todos los procesos relacionados con el enlace, así como del interfaz con las CMC, en las que se realiza la interconexión. Está vigilado por el SEC, microprocesador de proceso de señal responsable de la supervisión de cada

dor de 15 kbit. Cada CMC incorpora 15000 puertas y 31 kbit de memoria.

Se han estudiado varias tecnologías para realizar el elemento de conmutación ATM. En general, la CMOS es preferible cuando se trabaja por debajo de los 100 MHz con componentes de alta densidad porque minimiza el consumo. Aunque todavía se requiere tecnología ECL para velocidades elevadas (frecuencias de reloj de 600 MHz, por ejemplo), se estudian actualmente tecnologías CMOS avanzadas (0,5 μ m y por debajo) para su futura sustitución.

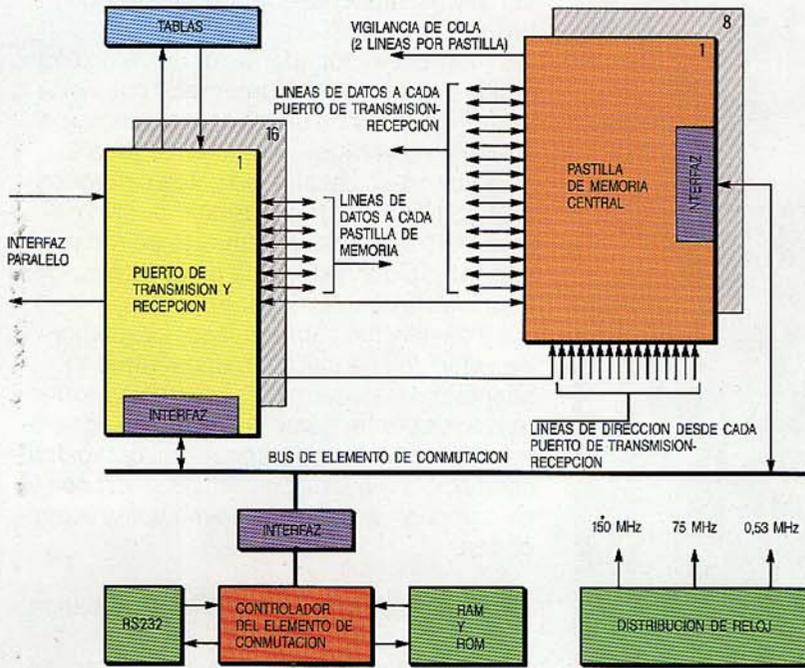


Figura 1
Configuración de un elemento de conmutación de banda ancha.

elemento de conmutación. En la recepción, el RTP recibe los datos de los demás elementos de conmutación o de una unidad terminal a través del interfaz externo ATM a 600 Mbit/s, forma las células (paquetes cortos de longitud fija) con los datos entrantes, los identifica por medio de su ICV (identificador de canal virtual) y los transmite a las CMC con la información de encaminamiento asociada, que depende del ICV y del modo de operación. En paralelo con el encaminamiento, se genera un nuevo ICV que reemplaza al entrante.

En la transmisión, el RTP recibe células de la CMC y las transmite al mundo exterior por el interfaz saliente ATM de alta velocidad. Su complejidad alcanza unas 16000 puertas lógicas.

La CMC conmuta células de 16 entradas a 16 salidas. La información de encaminamiento que el RTP asocia a la célula fija el destino de la misma, y por tanto ésta puede encauzarse hacia diferentes salidas. Al no haber correlación en el tráfico de los enlaces, cada salida necesita una cola de alrede-

Terminales de radio celular digital

En 1991 se introducirá en Europa un nuevo sistema paneuropeo de radiotelefonía celular, definido por el GSM (grupo especial móvil) de la CEPT. La transmisión, puramente digital, ofrecerá toda una gama de nuevos servicios y funciones al usuario. Se han desarrollado procedimientos enteramente nuevos para adaptarse al entorno de transmisión en comunicaciones móviles, afectado por fenómenos de propagación multirrayecto de rápida variación, así como por numerosas señales interferentes. Dichos procedimientos incluyen codificación de voz, acceso y modulación, codificación de canales, corrección de errores y ecualización multirrayecto, técnicas todas muy complejas desde el punto de vista de proceso de señal y de las tecnologías; la baja disipación y el alto grado de integración son esenciales.

La arquitectura de la estación móvil y transportable se muestra en la figura 2. El subsistema de radio lleva a cabo el proceso analógico de las señales de radiofrecuencia y frecuencia intermedia. El bloque receptor convierte la señal modulada entrante de 900 MHz en señales I (en fase) y Q (en cuadratura) que son tratadas por los convertidores analógico/digital y luego por la sección de banda de base. Sus principales funciones son la conversión de frecuencias, amplificación de bajo ruido, filtrado de canales y reducción del margen dinámico. La elección de una FI igual a cero permite realizar transmisor y receptor en una sola pastilla.

En el transmisor, las señales I y Q se convierten en señales analógicas de paso bajo, se transponen a 900 MHz y luego alimentan un amplificador de impulsos. La potencia de pico de salida del transmisor debe regularse con precisión para minimizar interferencias a otros usuarios.

El demodulador/ecualizador elimina la interferencia entre símbolos causada por la propagación multirrayecto. El decodificador de canal efectúa la codificación convolucional utilizando el algoritmo de Viterbi. En el

sentido de transmisión, el decodificador de canal y el demodulador ejecutan las funciones de codificación y entrelazado y generan las ondas I y Q para convertirlas a la señal modulada de 900 MHz.

El ecualizador multitrayecto y el decodificador de canal, junto con el codificador de voz, son los dispositivos más complejos del sistema en cuanto a proceso de señal e integración se refiere. Se les puede abordar de varios modos: DSP de finalidad general, DSP orientado a la aplicación, y pastilla VLSI a medida especializada. Las ventajas del DSP (proceso digital de señal) son una flexibilidad mayor merced a la modificación del soporte lógico, el bajo costo y el escaso riesgo, mientras que la opción VLSI a medida minimiza el consumo y el área de silicio.

Como el tamaño y la autonomía de uso son de capital importancia en un teléfono portátil, se decidió el desarrollo de un juego completo de pastillas integradas. La complejidad estimada para las pastillas codec de voz y demodulador/ecualizador es de uno 300 000 transistores.

Juego de pastillas para transmisión óptica a 2,24 Gbit/s

Se han diseñado tres circuitos importantes para un sistema de comunicaciones por fibra óptica a 2,24 Gbit/s⁴: un multiplexor 2:1, un demultiplexor 1:2 y un regenerador. La modelación avanzada de dispositivos, la simulación y una nueva técnica de diseño han permitido realizar este juego de pastillas en tecnología bipolar de silicio. Al principio no se sabía si el silicio podría tratar frecuencias tan altas, o si habría que recurrir al arseniuro de galio. Sin embargo, las medidas de los parámetros del proceso y unas simulaciones precisas indicaron que con técnicas adecuadas estos circuitos podrían realizarse en silicio. Así, por ejem-

plo, la partición cuidadosa reduce los acoplamientos mutuos y las pastillas encajan perfectamente en los encapsulados para minimizar la inductancia de los hilos de conexión. Además se desacopla internamente la distribución de reloj y su fase se define con precisión mediante un divisor de frecuencia 1:2. Los condensadores integrados en la pastilla desacoplan los voltajes de alimentación.

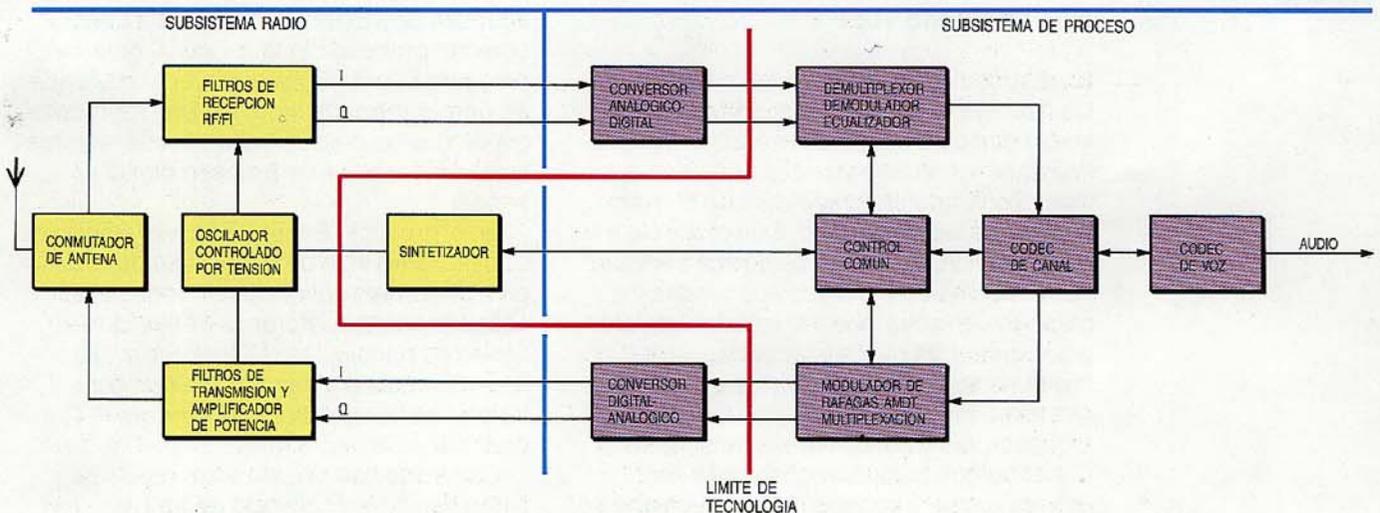
Las tres pastillas miden 3 x 3 mm, y cada una tiene de 500 a 800 componentes. Las pruebas del sistema han demostrado que sus prestaciones son excelentes y que trabajan bien hasta 2,5 Gbit/s en toda la gama de temperatura⁵.

Matriz de conmutación de banda ancha a 140 Mbit/s

Se ha realizado por vez primera en tecnología CMOS de 1,5 μm un SMC (circuito de matriz de conmutación) de 16 x 16 (+ 16) totalmente a medida⁶. Es el elemento esencial de las centrales de banda ancha utilizadas en sistemas de distribución de TV y sonido estereofónico, y en los de videotelefonía y videoconferencia. Su núcleo es una matriz de 16 x 16 puntos de cruce que puede conmutar cualquier entrada o nivel fijo a cualquier salida. 16 entradas suplementarias, que pueden ser conmutadas a sus correspondientes puertos de salida, permiten conectar varios SMC en cascada formando una red de conmutación mayor.

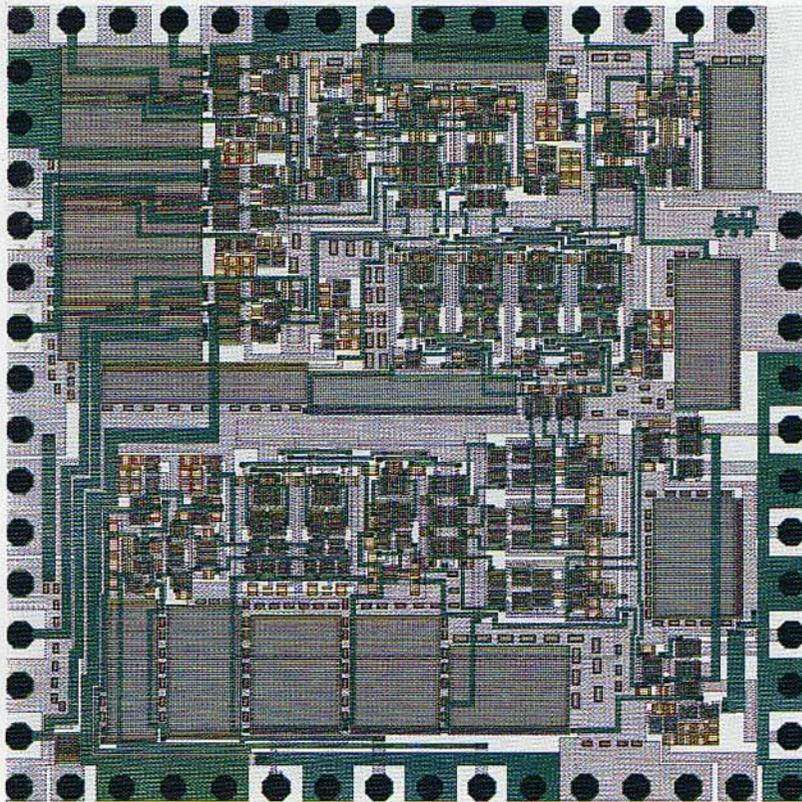
Los puertos de entrada se equipan con amplificadores diferenciales para regenerar las señales de entrada. En la parte de sincronización, la fase de las señales de datos se ajusta a la de las señales de reloj correspondientes. Cada uno de los 16 puertos de salida controla una línea de 50 ohmios y, cuando no se utilizan, estos amplificadores de salida pasan a alta impedancia (salidas

Figura 2
Arquitectura de las estaciones móviles y transportables de un sistema de radio digital celular.



tri-estado) para reducir el consumo y poder conectarse a estructuras de bus.

El SMC incorpora facilidades tales como un generador y un receptor de datos de prueba. Las señales del generador se pueden conmutar a todos los puertos de entrada. El receptor recibe señales de los puertos de entrada y/o de los de salida. La comparación de los datos recibidos con los transmitidos permite detectar los fallos del circuito. La tasa de errores de bit se mide con ayuda de un microprocesador externo y de circuitos de prueba integrados.



Circuito demultiplexor 1:2 realizado en tecnología bipolar de silicio de alta velocidad

Nuevas tendencias y focos de investigación en diseño VLSI

En respuesta a la complejidad creciente de los "sistemas en silicio", el enfoque de la investigación se desplaza desde la simple implantación VLSI hasta el diseño de sistemas, siguiendo una estrategia de compromiso entre la una y el otro. Con respecto a la realización VLSI, Alcatel se dedica a adquirir herramientas comerciales adecuadas y a participar en acuerdos industriales estratégicos, mientras que sus actividades de investigación se concentran en el diseño de alto nivel, partición de sistemas, diseño de arquitecturas y herramientas de síntesis.

Alcatel colabora estrechamente con universidades y centros de investigación

para obtener avanzados métodos de diseño que cubran los campos mostrados en la figura 3:

- *Herramientas de diseño de sistema*: para describir un sistema de telecomunicación completo se utilizan lenguajes de descripción formal, y luego se le divide en equipo, soporte lógico y microprogramación. Todas estas partes se pueden desarrollar y comprobar con el mismo entorno.
- *Arquitectura en silicio*: las herramientas de síntesis de alto nivel pueden traducir automáticamente una representación funcional a una estructural, por lo que deben estudiarse nuevos métodos de diseño arquitectural.
- *Herramientas de diseño en silicio*: la nueva generación de compiladores digitales permite directa traducción de un algoritmo al silicio.
- *Entorno mixto analógico/digital*: muchos sistemas de telecomunicación requieren tanto el diseño analógico de células como el proceso digital de señal. Hay nuevos proyectos de investigación, como Esprit II-IDPS, que prestará una atención considerable a compiladores analógicos en silicio.

Herramientas de síntesis VLSI

Al seguir aumentando la complejidad de los equipos y de los circuitos VLSI, crece la necesidad de herramientas de síntesis capaces de compilar automáticamente en silicio un algoritmo descrito en lenguaje de alto nivel. La tarea es complicada por el elevado número de algoritmos y arquitecturas que pueden materializarse en silicio.

Como no es todavía factible construir un sistema automático adecuado para todo tipo de aplicaciones, el desarrollo actual apunta a aplicaciones específicas tales como el proceso digital de señal objeto del proyecto Esprit 97. Este proyecto pretende en primer término implantar una metodología de diseño basada en la síntesis automática de algoritmos de proceso digital de señal.

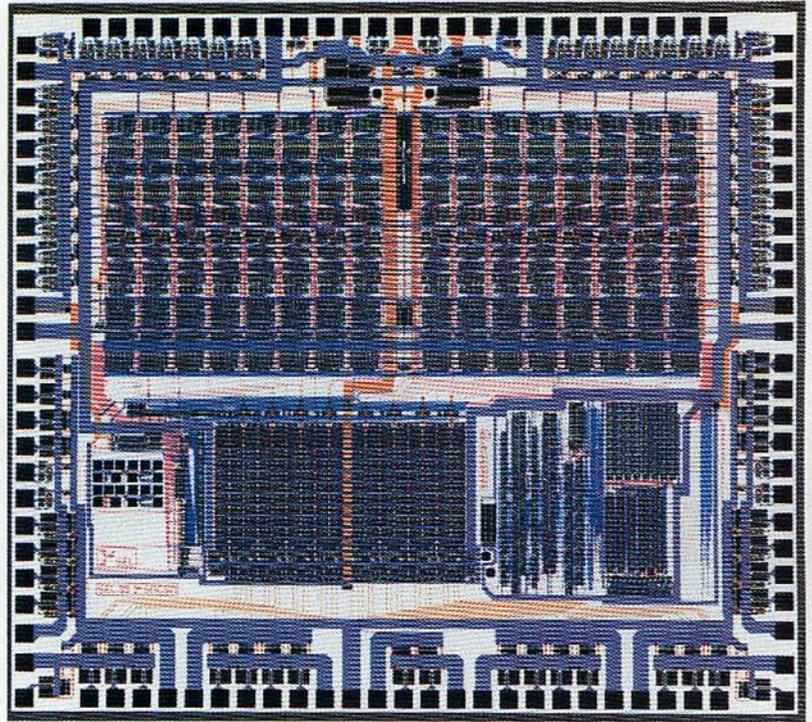
En el proyecto Esprit 97 se han elaborado tres herramientas de síntesis automática para diferentes aplicaciones, todas ellas basadas en un compromiso entre dos aspectos principales: síntesis de arquitectura y síntesis del trazado. Se han construido tres compiladores: Cathedral I, Cathedral II y Cathedral III.

Cathedral I se orienta a la síntesis de filtros digitales. Partiendo de una des-

cripción de la especificación del filtro, es decir, tipo, anchura de banda, orden y frecuencia de corte, Cathedral I genera una descripción estructural utilizable por la herramienta de síntesis del trazado. Esta herramienta usa una biblioteca de células predefinidas bastante independientes de la tecnología. La arquitectura se basa en un tratamiento serie con una estructura de control sencilla, suficiente para las aplicaciones de filtrado digital.

Este tratamiento serie ya no es suficiente para materializar algoritmos de proceso de señal más complejos y en tiempo real (p. ej., proceso de voz) que conllevan numerosas funciones de decisión. El compilador en silicio Cathedral II fue preparado para simplificar la generación de tales aplicaciones multiproceso⁷. El algoritmo se reparte primero en varios procesadores comunicados, pudiendo cada uno de ellos ser optimizado para su propia tarea. Cada procesador posee una arquitectura de camino de datos especial supervisada por un controlador de ramas múltiples, que consiste en una ROM de microcódigo y en varias PLA (disposición de lógica programable) suplementarias.

Sin embargo, esta arquitectura no es idónea para aplicaciones que requieren velocidades de muestreo de más de 10 Mbit/s, y por ello hay que recurrir a otra. La arquitectura objeto para los sistemas construidos con Cathedral III se basa en controladores de equipo físico y procesadores en red sistólica realizados en un sistema de tratamiento paralelo.



Circuito de la matriz de conmutación de 16 x 16 que mide 5,5 x 6,2 mm² y contiene 40 543 transistores. La disipación típica es 250 mW.

En Cathedral II se recurre a métodos de síntesis muy avanzados. Comenzando con una descripción del algoritmo en el lenguaje de alto nivel de Cathedral, llamado SILAGE, cada instrucción debe implantarse en un operador de circuitos parametrizable, disponible en la arquitectura objeto. La herramienta de síntesis por reglas que lleva esto a cabo, traduce cada operador SILAGE a un operador de circuito. Esta síntesis genera

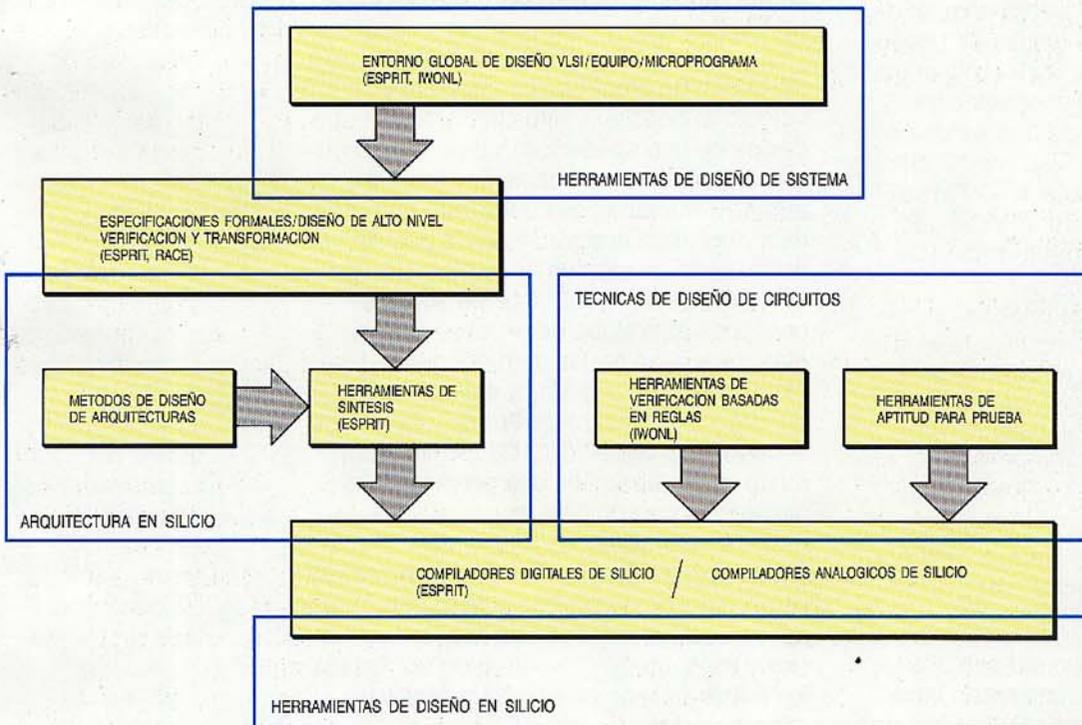


Figura 3
Areas clave de investigación en metodologías de diseño VLSI.

una serie de instrucciones de transferencia de registros de orden no definido. El siguiente paso es generar con ayuda de un programa las temporizaciones óptimas para las instrucciones de transferencia de registros. El resultado es un microcódigo simbólico que sirve de entrada a la herramienta de síntesis de trazado – en esencia un juego de generadores de módulos – y a la herramienta que determina el emplazamiento de las unidades de ejecución y el encaminamiento dentro de un módulo (bloque funcional para la pastilla).

Los algoritmos decodificadores de un codec de voz para red de radio móvil celular (extracción regular de impulsos, algoritmo de predicción a largo término) se han utilizado para probar el compilador Cathedral II. Los resultados son muy alentadores, pues los tiempos de diseño se reducen drásticamente, y en unas semanas se pasa de la especificación al trazado. Al estar optimizado totalmente para ese algoritmo, el circuito resultante es más pequeño y más rápido.

Métodos de diseño de arquitectura VLSI

La evolución reciente de la tecnología VLSI desplaza el centro de interés desde la realización (a nivel de puertas) al diseño de arquitecturas VLSI (nivel de sistema). Se trata hoy de diseñar un "sistema en silicio" o de formar un sistema con un juego básico de circuitos VLSI, y por tanto se necesitan métodos y herramientas que sustenten el diseño de arquitecturas VLSI de sistemas electrónicos.

Los circuitos VLSI son piedra angular de los modernos sistemas digitales de telecomunicación. Por ejemplo, la sinergia entre técnicas de conmutación y tecnologías VLSI es la base de la red de conmutación de las centrales digitales Sistema 12. Similarmente, la red de conmutación ATM se apoya en nuevas arquitecturas VLSI que ofrecen mecanismos de optimización de colas.

Los nuevos sistemas de telecomunicación que exploten al máximo el potencial de la tecnología VLSI deben reconsiderar enteramente la arquitectura del circuito integrado, desde el nivel del diseño de arquitectura. Desde este punto de vista, el RISC (ordenador con juego de instrucciones reducido) es un ejemplo de optimización de ingeniería por arquitectos de procesadores, conforme a los siguientes principios:

- Las instrucciones deben ser sencillas a no ser que haya una buena razón para mayor complejidad. Para resultar útil, una

nueva instrucción que incremente el tiempo de ciclo el 10% debe reducir al menos un 10% el número total de ciclos ejecutados.

- Los microcódigos no son generalmente más rápidos que las instrucciones cableadas. Cambiar a microcodificación el soporte lógico no significa mejora, y en cambio complica cualquier modificación.

Las arquitecturas VLSI multiproceso son esenciales para la implantación de las futuras redes inteligentes. Deben estudiarse los compromisos coste/prestaciones que presentan, como son el número de buses, la memoria compartida y el control centralizado o distribuido.

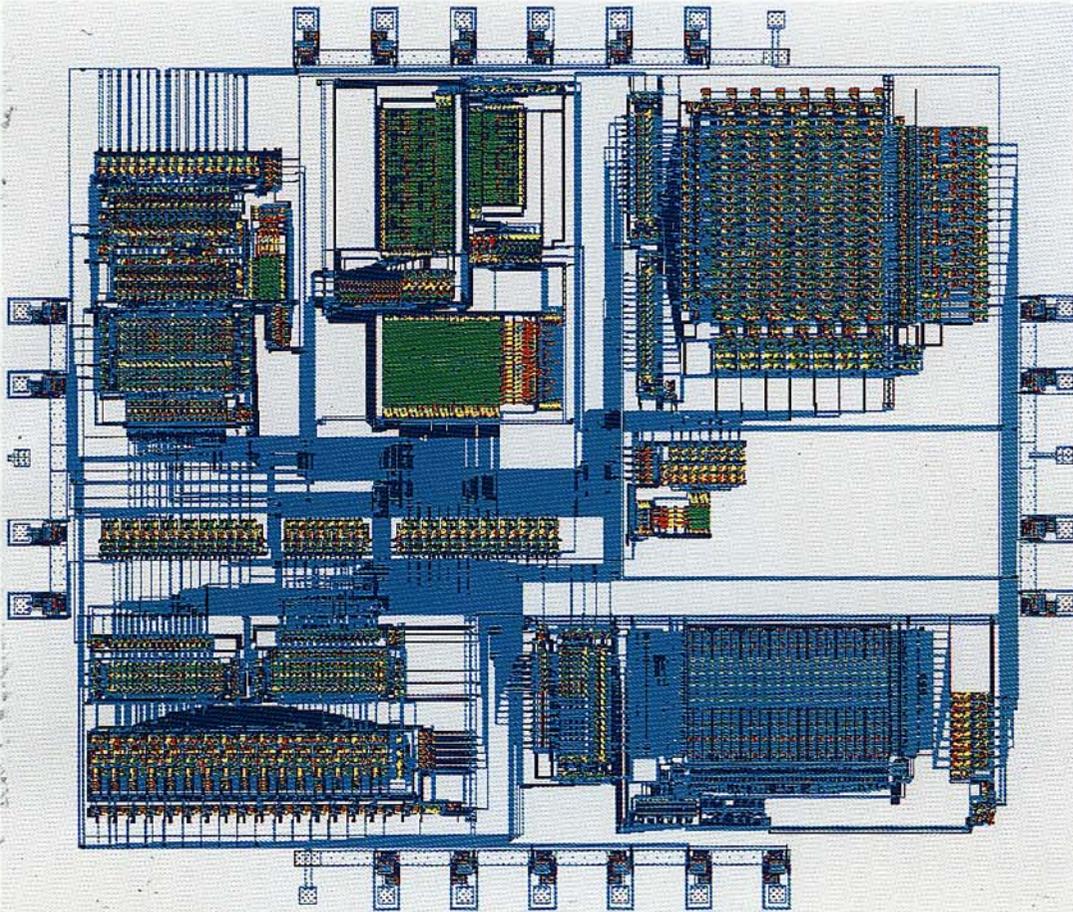
La arquitectura RISC VLSI de los dispositivos llamados "transputers" es otro ejemplo de sinergia entre tecnología VLSI y arquitecturas de sistemas. Una red de transputers se adapta bien a la construcción de una arquitectura de flujo de datos del tipo que podrá necesitarse para un punto de servicio del sistema RDSI-BA.

Finalmente, las redes sistólicas son idóneas para uso "manos libres" en sistemas de radio móvil en los que un módulo VLSI, basado en el algoritmo de Viterbi, permite decodificación rápida con corrección de error en canales de datos. El concepto de red sistólica se aplicó con éxito en el circuito interfaz U de RDSI de banda estrecha, y puede ofrecer una solución económica para un conmutador ATM de RDSI-BA.

Desarrollo de métodos de autoprueba en VLSI

No cesan de crecer la complejidad y la velocidad de los circuitos integrados específicos de una aplicación, y esto encarece grandemente las pruebas. El problema admite solución eficaz utilizando métodos de autoprueba integrados en la pastilla, basados en interfaces de exploración periférica o de otro tipo. El interés actual se centra en esta clase de pruebas y en la elaboración de reglas de diseño para facilitar la prueba de pastillas y placas. La propuesta "Exploración periférica y puerto de acceso de prueba" del "Grupo de trabajo mixto de pruebas" es una prometedora plataforma común para muchos tipos de medios de prueba.

La exploración periférica en sí misma no es un entorno de prueba activo, pero puede aplicarse a los métodos de prueba ordinarios y a los integrados. Sirve de vehículo a los datos de la prueba hacia y desde el entorno exterior.



Trazado compilado de un decodificador de voz para un sistema de radio móvil celular. Este trazado representa la primera iteración realizada con el compilador Cathedral II.

Se estudian hoy varios bloques funcionales para implantar procedimientos de auto-prueba en circuitos VLSI. La estrategia básica es:

- introducir células de exploración periférica como interfaz de prueba común en todos los nuevos circuitos total y parcialmente a medida
- estructurar los circuitos más complejos en particiones que puedan ser probadas con los medios incorporados o con otros medios de prueba.

Se han diseñado ya varios circuitos con éxito siguiendo estas directrices. Ejemplos son una matriz de conmutación de banda ancha a 140 Mbit/s, un multiplexor/demultiplexor a 140 Mbit/s, un controlador de verificación de redundancia cíclica y un interfaz de control de banda ancha.

La integración de las pruebas influye grandemente sobre su coste y sobre la mantenibilidad de los circuitos VLSI.

Tecnologías avanzadas VLSI

Los centros de diseño utilizan generalmente las tecnologías de semiconductores más avanzadas en los nuevos productos.

Muy a menudo, sin embargo, esas tecnologías no están enteramente caracterizadas, y se ha de consumir esfuerzo en la simulación y medida de parámetros para su evaluación, lo que es de especial importancia en diseños CMOS de submicras y diseños mixtos analógico/digital en tecnología BICMOS. Como los parámetros estándar de los modelos MOS dependen de su geometría, es preciso conocer los juegos de parámetros específicos de cada tamaño de transistor, y para cubrir la gama geométrica de los mismos dentro de un diseño dado hay que evaluar y medir por separado numerosos juegos de parámetros. Para reducir este esfuerzo, se ha desarrollado e incluido en la estrategia de diseño un nuevo procedimiento⁸, que ofrece una elección ilimitada de geometrías de transistores CMOS e incrementa la precisión de la simulación del circuito. Se establece la dependencia geométrica para los parámetros de los transistores de canal corto, sustituyendo algunos parámetros estándar por funciones analíticas que reflejan dicha dependencia. Mediante tales funciones automáticamente se crea un juego de parámetros de modelo especializado para cualquier tamaño de transistor que utilicen los diseñadores. Además de simular el comportamiento típico del circuito, el procedimiento

simplifica también la simulación de los casos límite.

Aparte de las aplicaciones CMOS y BiCMOS, se estudian tecnologías avanzadas, tanto las de GaAs y GaAlAs como las bipolares de silicio, para aplicaciones en la gama de los 10 Gbit/s. Las investigaciones abarcan la modelación a frecuencias altas y los aspectos físicos.

Es difícil medir con precisión los parámetros intrínsecos en CA sobre la oblea, particularmente a frecuencias altas. Como las dimensiones de los dispositivos son cada vez menores, el posicionamiento mecánico de contactos sobre la oblea resulta muy difícil. Es mucho mejor la medida de señales eléctricas con un microscopio de barrido electrónico (técnicas de contraste de tensión).

Pueden así tomarse formas de onda en nodos internos del circuito, sin la distorsión que introducen puntas de prueba mecánicas, a 300 MHz con resolución en el tiempo de 500 ps y en el espacio de 0,5 μm ; ésta es pues una técnica adecuada para estudiar el comportamiento eléctrico en conmutación de circuitos complejos y localizar errores de diseño. Para investigar cómo opera en conmutación un transistor de alta frecuencia, sin influencia de parásitos externos, puede utilizarse una nueva técnica de correlación que permite medir retardos en señales hasta de 40 ps en menos de 1 ms. Esto es importante para análisis precisos en alta velocidad y para explorar los mecanismos intrínsecos que limitan la misma.

Conclusiones

Las necesidades a largo plazo de Alcatel en cuanto a herramientas CAD para el desarrollo de circuitos VLSI en aplicaciones avanzadas de telecomunicación, e implantar nuevas tecnologías y métodos de diseño, exceden en mucho las capacidades de los equipos disponibles en el mercado. Por ello, se investiga en cooperación con destacadas universidades, centros de investigación, y otros socios industriales en el marco de programas nacionales, Esprit y RACE en lo que respecta a especificaciones formales, compilación en silicio de circuitos integrados analógicos y digitales, herramientas de autoprueba basadas en reglas, y técnicas de modelación y encapsulado de dispositivos de altas velocidades.

Traducir los resultados de los programas de investigación a realidades industriales exigirá nuevas iniciativas conjuntas, preferiblemente auspiciadas por la Comunidad

Europea, en las que colaboren socios como:

- universidades e instituciones de investigación que hayan realizado las investigaciones básicas
- socios industriales, tales como proveedores de silicio y casas de sistemas, para garantizar flexibilidad y un mercado inicial suficiente
- compañías dedicadas a informática, especializadas en diseño asistido por ordenador, para modificar los programas prototipos para aplicaciones comerciales.

Los programas de investigación microelectrónica descritos en este artículo son un pilar básico de la investigación global y esfuerzo tecnológico común, necesario para mantener y reforzar la posición tecnológica y comercial de Alcatel como suministrador mundial de telecomunicación.

Referencias

- 1 F. Van Simaeys, J. Adams y D. Rabaey: An ISDN S-interface Transceiver for Public and Private Digital Loops: *European Solid State Circuit Conference*, Manchester, septiembre 1981.
- 2 D. Sallaerts, D. Rabaey, R. Dierckx, J. Sevenhans, D. Haspenlagh y B. De Ceulaer: A Single Chip U-interface Transceiver for ISDN: *IEEE Journal of Solid State Circuits*, diciembre 1987, volumen 22, n° 6.
- 3 D.H. Rabaey, H.J. Busschaert, P.P. Reusens y L.M. Verpooten: A Rate Adapter Coprocessor for Terminal Adapters and U-interface Modems: *International Solid State Circuit Conference*, 1989, Nueva York.
- 4 E. Gerhard, R. Heidemann, E. Schlag, D. Suikat y U. Willrett: Anwendungsorientierte integrierte Silizium-Bipolarschaltungen für ein 2,4 Gbit/s-Laborsystem: *ITG-Fachbericht 103, Mikroelektronik für die Informationstechnik*, Vorträge der ITG-Fachtagung 3.– 5. 10. 1988, Berlín.
- 5 R. Heidemann: Sistemas de transmisión optoelectrónicos de alta velocidad: *Comunicaciones Eléctricas*, 1988, volumen 62, n° 3/4, págs. 318–324 (en este número).
- 6 D. Böttle: An Advanced 1.5 μm CMOS Crosspoint Element for High-speed (140 Mbit/s) Switch Application: *COMPEURO 1989*, Hamburg, mayo 1989 (se publicará).
- 7 J. Adams, J. J. Schmit y M. Van Camp: Design of a Speech Decoder Chip with Cathedral II: *IMEC Sprit 97 workshop*, Lovaina, enero 1989.
- 8 Th. Brenner, A. Edmonds y G. Wipler: Model Parameter Generation for High-performance Circuit Simulation: *COMPEURO 1989*, Hamburg, mayo 1989 (se publicará).

Johan M. Danneels nació en Aalter, Bélgica, en 1949. Se graduó MS en ingeniería electromecánica y PhD en electrónica en 1972 y 1976, respectivamente, en la Universidad Católica de Lovaina. En 1983 se graduó Master en Administración de Empresas en la Universidad Boston de Bruselas. El Dr. Danneels ingresó en 1976 en el Centro de Investigación de Alcatel Bell y posteriormente dirigió el laboratorio central de microelectrónica. En 1984 fue nombrado responsable de la división de desarrollo de circuitos para conmutación y transmisión. Además, el Dr. Danneels es oficial del área clave de investigación en microelectrónica de Alcatel.

Michael Rahier nació en Namur, Bélgica, en 1953. Se graduó ingeniero eléctrico y se doctoró en microelectrónica en la Universidad de Lovaina en 1976 y 1979, respectivamente. El año siguiente ingresó en el Centro de Investigación de Alcatel Bell en Amberes, donde trabajó en diseño de circuitos integrados a medida, en herramientas CAD avanzadas y en tecnología microelectrónica. El Dr. Rahier es actualmente responsable del departamento de tecnología de circuitos en Alcatel Bell en Amberes.

Albrecht Mozer nació en Hessigheim, Alemania, en 1952. Recibió la graduación de ingeniero diplomado en 1980 y el doctorado en 1984, ambos por la Universidad de Stuttgart. En 1984 trabajó en el Instituto de Tecnología de Tokio antes de ingresar en el Centro de Investigación de Alcatel SEL en Stuttgart, en el que trabajó en investigación y desarrollo de dispositivos optoelectrónicos. Desde 1988 el Dr. Mozer es el responsable de división en el centro de diseño de microelectrónica. Además, es responsable corporativo de los proyectos estratégicos de herramientas VLSI avanzadas y de pastillas y subsistemas en Alcatel.

Peyre, J. L.; Rivière, D.; Vannier, C.; Villela, G.

Ataque de semiconductores y metales inducido por láser de excimeros

Comunicaciones Eléctricas (1988), volumen 62, n° 3/4, págs. 222-228

En los últimos años ha habido un interés creciente por el desarrollo de nuevas técnicas para el ataque de los materiales utilizados en microelectrónica y optoelectrónica. Los láseres de excimeros en los ultravioleta, por sus singulares propiedades (bajas longitudes de onda, corta duración de la exposición y poca coherencia espacial), pueden ser útiles para inducir o potenciar reacciones superficiales. Se han estudiado en estos laboratorios gran variedad de interacciones gas-sólido con un láser compacto de fabricación propia. Así, se ha irradiado fosforo de indio con fotones de 193 nm en atmósfera de CF_3Br y luego se ha investigado el ataque del silicio y del aluminio en gas de cloro con radiaciones de 308 nm y 248 nm. El ataque con especies neutras, el proceso sin máscaras, la selectividad de ataque del material y los pequeños daños eléctricos son las características más atractivas de estas nuevas técnicas.

Dorn, R.

Puertas ópticas para impresoras de alta resolución y gran velocidad

Comunicaciones Eléctricas (1988), volumen 62, n° 3/4, págs. 229-234

Las futuras impresoras de oficina habrán de ofrecer una gama de tonos y colores de alta calidad a un coste razonable. Una de las tecnologías que SEL desarrolla para conseguirlo se basa en una cabeza de impresión óptica de cerámica ferroeléctrica. El autor describe los principios de este dispositivo, que utiliza la birrefringencia inducida por un campo para conmutar la luz a altas velocidades y analiza el uso de la tecnología de capa delgada para realizar un conjunto lineal de puertas ópticas de alta densidad y conseguir así una alta resolución. Se ha demostrado ya que es factible utilizar esta técnica para impresión en una gama tonal de blanco y negro y en color. Las principales ventajas frente a otras tecnologías son una resolución mayor de 600 puntos por pulgada, fuerte contraste y alta velocidad de salida, además de tamaños casi ilimitados.

Dorn, R.; Le Sergent, C.

Tecnologías de las preformas para fibras ópticas

Comunicaciones Eléctricas (1988), volumen 62, n° 3/4, págs. 235-241

Los procesos actuales de producción de preformas están cerca de alcanzar los límites de las características de los parámetros de las fibras. La investigación se dirige en la actualidad a conseguir que los procesos actuales sean más económicos, y a desarrollar nuevos procesos más eficaces que satisfagan la demanda en un futuro próximo, cuando las fibras ópticas se utilicen en el bucle de abonado. Los autores describen las soluciones a medio y largo plazo de Alcatel, las cuales se basan respectivamente en una mejora de los procesos existentes en sus compañías, y en investigaciones de los procesos SPCVD de plasma y de una técnica para moldear mecánicamente las preformas a partir de polvo. Los resultados conseguidos hasta el momento son prometedores, no previniéndose grandes obstáculos, aunque queden por resolver algunos problemas tecnológicos.

Hildebrand, O.; Benoit, J.; Duda, E.

Investigación en componentes optoelectrónicos

Comunicaciones Eléctricas (1988), volumen 62, n° 3/4, págs. 242-250

Los importantes avances registrados estos últimos años en las prestaciones de sistemas de comunicaciones ópticas provienen de investigaciones y desarrollos sobre componentes optoelectrónicos. Para atender las exigencias de los sistemas futuros, el Grupo de Investigación de Alcatel NV trabaja en las próximas generaciones de transmisores y receptores electroópticos, preparando las bases de los futuros circuitos integrados optoelectrónicos que sustituirán a los láseres y detectores de función única. Los autores describen los logros del Grupo hasta hoy y analizan el desarrollo previsible.

Amouroux, C.; Pestie, J.-P.; Iseret, I. R.

Producción de componentes optoelectrónicos

Comunicaciones Eléctricas (1988), volumen 62, n° 3/4, págs. 251-258

Los sistemas de transmisión ópticos extenderán considerablemente su influjo tanto en enlaces de larga distancia como en redes locales. Para garantizar el máximo aprovechamiento de estos sistemas hay que desarrollar tecnologías de fabricación nuevas y más eficientes que permitan optimizar las prestaciones de los dispositivos y su rendimiento de producción. Los autores describen los nuevos procesos que se desarrollan e introducen en Alcatel para la producción de componentes optoelectrónicos y microelectrónicos, y esbozan la evolución futura en este área.

De Man, J.; Duponcheel, L.; Van Puymbroeck, W.; Pérez Domínguez, R.

Especificación, diseño, prototipos y verificación de sistemas de programación

Comunicaciones Eléctricas (1989), volumen 62, n° 3/4, págs. 259-264

Las técnicas formales son un nuevo método para simplificar y hacer más fiable y rentable el desarrollo de programas y sistemas informáticos. El uso de estas técnicas permite definir un sistema de forma precisa e inequívoca antes de ser realizado en la práctica, y además facilita un razonamiento riguroso sobre descripciones de sistemas. Por tanto, el desarrollo de especificaciones formales complementa la escritura de descripciones informales, que suelen hacerse en lenguaje natural. Los autores examinan desarrollos recientes en el área de especificaciones formales de sistemas de programación, y en particular, los principios de la ingeniería de programación, la rápida elaboración de prototipos y el análisis de especificaciones.

De la Cruz, P.; Pérez Riesco, A.

Programas Ada correctos a partir de especificaciones algebraicas: el proyecto PROSPECTRA de ESPRIT

Comunicaciones Eléctricas (1988), volumen 62, n° 3/4, págs. 265-272

El proyecto PROSPECTRA estudia una metodología y un sistema para obtener programas libres de errores. La metodología integra la construcción y la verificación de los programas durante el desarrollo de los mismos. Una especificación de requisitos inicial se va transformando poco a poco en un programa ejecutable mediante la aplicación de reglas de transformación. La versión final es correcta por construcción, demostrándose la corrección de las reglas de transformación una sola vez, con ayuda del sistema. El sistema ejecuta automáticamente las transformaciones, dirigido interactivamente por el programador. Las especificaciones, programas, transformaciones y desarrollos se almacenan en una base de datos, lo que permite su reutilización. Los autores describen el sistema PROSPECTRA, que incluye editores interactivos dirigidos por sintaxis para los lenguajes de desarrollo y transformación, herramientas de verificación para demostrar la corrección y aplicabilidad de las transformaciones, y herramientas de almacenamiento y de búsqueda.

Barachini, F.; Benoit, Ch.

Tecnologías de inteligencia artificial para aplicaciones en tiempo real y orientadas a objetos

Comunicaciones Eléctricas (1988), volumen 62, n° 3/4, págs. 273-279

Los sistemas expertos aparecen como una tecnología muy prometedora para aplicaciones en numerosos campos. Aunque existen diversas envolturas para diferentes problemas, la mayoría de ellas no podían tratar con eficacia problemas críticos en tiempo. Otra desventaja era su incapacidad para manejar correctamente problemas que requieran características orientadas a objetos. Los autores describen dos herramientas para construir sistemas expertos que se han diseñado para superar estas restricciones. PAMELA aborda problemas de tiempo real, mientras que LORE ofrece un elegante enfoque orientado a objetos.

Villén Altamirano, M.

Reglas de asignación de prioridades para optimizar tiempos de respuesta

Comunicaciones Eléctricas (1988), volumen 62, n° 3/4, págs. 280-287

El autor presenta reglas de asignación de prioridades que optimizan el tiempo de respuesta y la longitud de la cola en un sistema. La base teórica de dichas reglas es una ley de conservación del trabajo medio pendiente en el sistema, ley que se generaliza y comprueba. Basándose en ella, se deducen las reglas y se aplican a un procesador multiprioridad con encadenamiento de tareas y prioridades sin interrupción, con interrupción o mixtas, mostrándose el importante impacto de la aplicación de las reglas. Las reglas se pueden aplicar para optimizar sistemas monoprocesadores o sistemas multiprocesadores, aplicándose en estos últimos a cada uno de los procesadores. El esfuerzo investigador dirigido a optimizar los sistemas actuales de Alcatel ha obtenido reglas suficientemente generales para poderse aplicar a los sistemas futuros.

Immendorfer, M.; Mumolo, E.

Recientes logros en tecnologías de proceso de voz y sus aplicaciones

Comunicaciones Eléctricas (1988), volumen 62, n° 3/4, págs. 288-293

La introducción del reconocimiento y la síntesis de voz en los equipos de oficina y de telecomunicación permitirá a los abonados acceder de un modo más atractivo a los servicios presentes y futuros. Se ha desarrollado un sistema multiprocesador universal para variadas aplicaciones de proceso de voz en tiempo real: reconocimiento de palabras aisladas y enlazadas, y la síntesis de la voz. El sistema tiene una capacidad aproximada de 1000 plantillas de reconocimiento de voz en tiempo real, y ha sido utilizado para demostrar las ventajas de los equipos de entrada/salida oral en los modernos servicios de oficina. Los autores describen varias aplicaciones, incluyendo un operador telefónico de control oral y un sistema de correo de voz, así como una máquina clasificadora de accionamiento oral.

Heiss, R.; Rousseau, A.; Verbiest, W.

Familia de codificadores de vídeo para redes STM y ATM

Comunicaciones Eléctricas (1988), volumen 62, n° 3/4, págs. 294-301

La codificación de los servicios de vídeo es un tema importante en el desarrollo de las futuras redes de banda ancha. Estos servicios abarcan una amplia gama de aplicaciones, desde vigilancia de baja calidad hasta el intercambio de material fuente de TVAD, o desde la videoconferencia interactiva a la distribución a gran escala de cientos de canales de TV. Por consiguiente se necesitan muchos tipos de codecs que satisfagan requisitos variados de velocidad binaria, calidad de imagen y complejidad. No obstante, estos videocodecs tienen partes comunes que permiten agruparlos en familias. Los autores describen las técnicas de codificación de vídeo para funcionamiento a 140 Mbit/s, destacando la realización práctica, y bosquejan los videocodecs basados en DCT, con velocidades de 64 kbit/s a 34 Mbit/s. Finalmente, debaten el uso de la codificación de vídeo en redes ATM (modo asíncrono de transferencia).

Boucheret, M.-L.

Demodulación multiportadora a bordo de satélites para repetidores no transparentes

Comunicaciones Eléctricas (1988), volumen 62, n° 3/4, págs. 302-309

El desarrollo de un futuro sistema de satélite orientado al usuario se basa en una espectacular reducción del tamaño de las estaciones terrenas. La utilización del acceso múltiple por distribución en el tiempo (AMDT) con un solo canal por portadora (SCPC) en el enlace ascendente, y multiplexación por división de tiempo (MDT) en el enlace descendente parece ser el método más adecuado para lograr este propósito. Un demodulador multiportadora convierte los canales de datos AMDF (acceso múltiple por distribución en frecuencia) en formato MDT. La autora describe las características principales de un modelo de laboratorio de un demodulador multiportadora (MCD) para validación de este nuevo concepto y detalla las mejoras que se necesitarán en la versión final.

Fritzner, C.; Presttun, K.; Richardsen, J.-T.; Søberg, G.

Sistema protegido experimental de información distribuida

Comunicaciones Eléctricas (1988), volumen 62, n° 3/4, págs. 310-317

A medida que las estaciones de trabajo inteligentes penetran más en el mundo de los negocios, se necesitará una seguridad mayor en la red, y por ello se trabaja intensamente en la normalización de los sistemas protegidos. Los autores describen una arquitectura de sistema distribuido protegido basada en el modelo ISA y muestran cómo se ha realizado esta arquitectura en una red protegida experimental, instalada por Alcatel STK y la Administración noruega de telecomunicaciones para estudiar problemas de seguridad y elaborar posibles soluciones. Finalmente, los autores exponen las mejoras que podría admitir en un futuro el sistema.

Heidemann, R.

Sistemas de transmisión optoelectrónicos de alta velocidad

Comunicaciones Eléctricas (1988), volumen 62, n° 3/4, págs. 318-324

Existe a nivel mundial una demanda creciente de enlaces de fibras ópticas de muy alta capacidad. En Alcatel SEL se han realizado pruebas de campo con un prototipo integrado de 2,24 Gbit/s/115 km; asimismo se ha logrado un enlace de 151 km, como primicia mundial. Actualmente en Alcatel se desarrolla un producto para esa velocidad de transmisión. Podrán obtenerse prototipos para velocidades de transmisión todavía mayores en los primeros años 90, como han demostrado las experiencias a 5 y 10 Gbit/s en el Centro de Investigación de Alcatel SEL.

Domann, G.

Red experimental BERKOM y concepto de RDSI-BA con distribución de TV

Comunicaciones Eléctricas (1988), volumen 62, n° 3/4, págs. 325-332

En marzo de 1988, Alcatel SEL instaló el primer sistema de transmisión y conmutación RDSI-BA, dentro de la red experimental BERKOM. El sistema, basado totalmente en los principios RDSI, admite canales de 2 y 140 Mbit/s, además de las facilidades propias de RDSI. Su núcleo es una central Sistema 12 RDSI con división espacial para las etapas de conmutación de banda ancha. 30 abonados se conectan a este equipo de transmisión que comprende el terminal de línea y la terminación de red de banda ancha, basado en un sistema de transmisión por fibra óptica bidireccional con láseres de 1300 nm y 1550 nm que cubre distancias de hasta 30 km. En el Centro de Investigación de Alcatel SEL se está ultimando un sistema con mejoras funcionales y tecnológicas, que además de los servicios de conversación ofrece distribución de TV y estereofonía.

De Prycker, M.

Comunicación de datos en una red ATM

Comunicaciones Eléctricas (1988), volumen 62, n° 3/4, págs. 333-337

Es probable que la futura red de banda ancha se base en el modo de transferencia asíncrono (ATM). Como dicha red cubrirá gran número de servicios de datos, habrá que tener en cuenta los especiales requisitos que la comunicación de datos impone a las ATM, particularmente en cuanto al retardo de establecimiento de la comunicación (en modo orientado a conexión y en modo sin conexión), asignación de recursos y tasa de errores. El autor analiza la repercusión del concepto ATM sobre tales requisitos.

Coupage, J.; Gastaud, G.; Le Bihan, G.

Nuevo protocolo para transmisión de datos en células ATM

Comunicaciones Eléctricas (1988), volumen 62, n° 3/4, págs. 338-342

Las técnicas ATM son atractivas por ofrecer un servicio de transferencia de datos a gran velocidad con alto rendimiento para comunicaciones tanto de extremo a extremo como de nodo a nodo dentro de una red ATM. Reutilizar las actuales soluciones del nivel 2 basadas en técnicas de tramas HDLC para encapsular la información de usuario de nivel superior no es lo más adecuado dentro de un entorno ATM, ya que en éste se exige que las funciones existentes, como las de segmentación y reensamblado, se ejecuten a nivel más bajo que el habitual, y que haya nuevas funciones, como la clasificación, cuando varias conexiones están activas simultáneamente en un extremo. Los autores proponen un nuevo protocolo optimizado para red ATM, que requiere sólo una pequeña sobrecarga en el cuerpo útil de la célula ATM y ofrece los servicios esperados a los protocolos de nivel superior.

Fioretti, A.; Rocchini, C.A.; Treves, S.R.; Torchin, L.

Arquitectura de redes locales y urbanas de fibra óptica para transmisión óptica coherente

Comunicaciones Eléctricas (1988), volumen 62, n° 3/4, págs. 343-351

En los últimos años se han notificado experiencias de utilización de receptores heterodinos para seleccionar un canal entre varios canales muy próximos en el dominio óptico (separaciones inferiores a 0,01 nm). Los artículos publicados han tratado asimismo de diferentes tipos de redes que podrían explotar mejor la anchura de banda de las fibras ópticas mediante multiplexación en frecuencias ópticas. Sin embargo, hasta ahora se ha prestado poca atención a la gestión de dichas redes y a la mejor manera de explotarlas para asegurar los futuros servicios de banda ancha. Este artículo expone dos métodos de diseño de redes multicanales coherentes y notifica varias soluciones adoptadas.

Danneels, J.; Mozer, A.; Rahier, M.

Investigación y tecnología en microelectrónica

Comunicaciones Eléctricas (1988), volumen 62, n° 3/4, págs. 352-361

La evolución en microelectrónica está conduciendo a dimensiones características del orden de submicra, que permiten integrar sistemas de creciente complejidad en una sola pastilla. Para satisfacer las exigencias de unos breves tiempos de desarrollo, alta productividad y corrección de construcción, el proceso de diseño creativo tenía que pasar desde el nivel de circuito al de sistema, ayudándose el diseñador con metodologías de diseño VLSI, herramientas de síntesis, arquitecturas de VLSI, técnicas de prueba, tecnologías de proceso avanzadas y modelación de dispositivos. El artículo describe los programas importantes de Alcatel en estas áreas, así como las actividades de diseño esenciales. Se describen asimismo varios conjuntos de pastillas VLSI de tecnología de punta, aplicables en la RDSI de banda estrecha y de banda ancha, terminales digitales de radio celular y transmisión óptica a 2,24 Gbit/s.

Cambios en el equipo editorial

Al terminar 1988, el equipo internacional responsable de las cuatro ediciones de esta Revista debe señalar varios cambios. Primeramente, la partida de Lester Gimpelson que ha dirigido *Electrical Communication* durante casi diez años y a quien se debe su modernización de estilo y composición, la introducción del color y la temática monográfica, cualidades que unidas al rigor técnico y acertada intuición del futuro, han contribuido a ensanchar la aceptación mundial de esta publicación. Los que hemos trabajado con Lester recordaremos siempre su firme apoyo y amistad, y hoy le deseamos cordialmente éxito en su nueva andadura.

También nos ha dejado Bernard Canceill, editor de *Revue des Télécommunications* durante un periodo de masiado breve pero muy intenso en el que supo armonizar las contribuciones de las compañías procedentes de CGE y de ITT. Sus colegas no olvidarán su simpatía y le agradecen su eficaz colaboración, deseándole un futuro muy feliz.

Catherine Camus sucede a Bernard como editora de *Revue des Télécommunications*, en la que lleva trabajando varios años, por lo que no dudamos que sabrá mantener el alto nivel de calidad logrado por sus predecesores. Finalmente, el nuevo Editor-Jefe internacional es Michael Deason, quien coordina desde hace nueve años las ediciones locales.

Oficinas Editoriales

La correspondencia relacionada con las diferentes versiones de *Electrical Communication* debe dirigirse al editor correspondiente:

Rod Hazell
Electrical Communication
P.O. Box 3
South Street, Romford
Essex, RM12AR, England

Wolfgang Schmid
Elektrisches Nachrichtenwesen
Lorenzstrasse 10
7000 Stuttgart 40
Bundesrepublik Deutschland

Antonio Soto
Comunicaciones Eléctricas
Ramírez de Prado, 5
28045 Madrid
España

Catherine Camus
Revue des Télécommunications
ALCATEL N.V.
33 rue Emeriau
75 725 Paris CEDEX 15
France